

**Definición de zonas de descarga hídrica por medio de análisis
geomorfológico e imágenes térmicas en la cuenca del río Piedras, Jericó-
Antioquia**

Por:

Santiago Arias Galvis

&

Joseph Betancourt Ortiz

Proyecto de grado como requisito para aplicar al título de Geólogo

Asesora:

Marcela Jaramillo Uribe, PhD.

Co-asesora:

Isabel Cristina Villada Arias, G.



**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
GEOLOGÍA
MEDELLÍN
2021**

Dedicatoria

A nuestros padres, profesores y amigos que, gracias a su apoyo desde los aspectos más personales, hasta los más académicos, han permitido la consecución de este logro tan importante para nosotros. Finalmente, a la ciencia pues esto solo es un grano de arena en la playa del conocimiento.

Agradecimientos

A nuestros padres, que con esfuerzo y sacrificio han podido brindar apoyo incondicional en todo momento, que después de conversaciones extensas del por qué estudiar geología han comprendido que hacer ciencia es una de las mejores formas de servir al mundo; gracias a su paciencia ven crecer cada vez más el profesionalismo en sus hijos. A nuestros profesores; especialmente a Marcela Jaramillo Uribe y a Isabel Cristina Arias Villada nuestras asesoras de proyecto de grado y a otros que no menos importantes, a lo largo de toda la carrera han podido comprender la sed de conocimiento de sus aprendices llevándolos por el camino del conocimiento científico en la búsqueda de respuestas de las preguntas más difíciles que puede plantear la naturaleza. A los compañeros y amigos, que estuvieron con nosotros a lo largo del tiempo en la Universidad y que de una u otra manera han servido de apoyo moral o académico en momentos de dificultad o de disfrute.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	8
2	GENERALIDADES	10
2.1	Pregunta de investigación	10
2.2	Hipótesis	10
2.3	Objetivos	10
2.3.1	Objetivo general.....	10
2.3.2	Objetivos específicos.....	10
3	ÁREA DE ESTUDIO	11
3.1	Localización	11
3.2	Variación de temperaturas en la zona.....	12
3.3	Geometría de la cuenca del río Piedras.....	12
3.4	Geología.....	12
3.4.1	Geología regional	12
3.4.2	Geología estructural	14
3.4.3	Geología local.....	16
3.5	Geomorfología	18
4	Glosario	20
4.1	Descarga de aguas subterráneas	20
4.2	Recarga de aguas subterráneas	20
4.3	Sistemas de Información Geográfica y su uso en el modelamiento de las aguas subterráneas	20
4.4	Sensores remotos usados en la identificación de zonas de descarga de aguas subterráneas	20
4.5	Misiones LANDSAT e imágenes TIR	20
5	METODOLOGIA.....	22
5.1	Recopilación de datos.....	23
5.2	Procesamiento	23
5.2.1	Modelo de Elevación Digital (MED)	23
5.2.2	Mapas temáticos y Modelos	24
5.3	Mapas de temperatura de superficie (LST)	25
5.3.1	Adquisición de imágenes térmicas	25
5.3.2	Parámetros predefinidos para la adquisición de las imágenes térmicas	26

5.3.3	Cálculos ráster y creación de mapas LST	26
5.4	Delimitación de zonas de descarga.....	29
5.4.1	Análisis de importancia por rangos y categorías de cada modelo.	30
5.4.2	Selección del mejor modelo.....	31
5.5	Análisis de los flujos.....	32
5.6	Validación de la información	32
5.7	Modelo 3D.....	32
6	RESULTADOS	33
6.1	Mapa de Pendientes	34
6.2	Mapa de Aspectos u orientación de las laderas.....	37
6.3	Mapa de Curvatura.....	39
6.4	Mapa de lineamientos	41
6.5	Mapas de la temperatura superficial del suelo (LST)	44
6.6	Mapa de zonas de descarga	49
6.6.1	Asignación de pesos y análisis estocástico	49
6.7	Validación de zonas de descarga.	52
6.8	Modelo conceptual 3D de flujos para la cuenca del río Piedras.....	53
7	DISCUSIÓN.....	54
7.1	Geología en tiempos de pandemia	54
7.2	Método de asignación de importancia y peso por variable.....	54
7.3	Nubosidad y anomalías térmicas	54
7.4	Curvatura y zonas de descarga	55
7.5	¿Son estas zonas de descarga, manantiales o humedales?	56
7.6	Temperaturas y zonas de descarga.....	56
7.7	Pendientes y zonas de descarga	56
7.8	Lineamientos y zonas de descarga (continuidad de los lineamientos en profundidad).....	57
8	CONCLUSIONES	58

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Mapa de ubicación de la cuenca del río Piedras en Jericó, Antioquia. Creación propia.	11
Fig. 2. Mapa de la Geología regional, basado en las planchas 166 Jericó y 186 Riosucio elaborado por Calle, B., y González, H. (1980)	13
Fig. 3. Mapa geológico local para la cuenca del río Piedras. Donde E3N1as corresponde a el miembro superior de la Formación Amagá, N1N2da diques y silos andesíticos, Q2al depósitos aluviales cuaternarios, N1cv Formación Combia y N2dh son pórfidos andesíticos.	17
Fig. 4. Mapas geomorfológicos de la cuenca del río Piedras. creación propia.	18
Fig. 5 flujograma del proceso metodológico.	22
Fig. 6. Flujograma, para código de automatización de código en Python modelado en la herramienta Model Builder.	28
Fig. 7. Mapa de la división de la cuenca del río Piedras. Creación propia.	33
Fig. 8. Mapa de pendientes que indica la inclinación del terreno en porcentaje. Creación propia.	35
Fig. 9. Histograma con porcentaje de área por cada rango de pendiente sobre el área total de la cuenca del río Piedras. Creación propia.	36
Fig. 10. Mapa de orientación de las laderas para la cuenca del río Piedras. Creación propia.	38
Fig. 11. Porcentaje de categorías del área total la cuenca según orientación de las laderas. Creación propia.	39
Fig. 12. Mapa de curvaturas que indica la forma de la pendiente para la cuenca del río Piedras. Creación propia.	40
Fig. 13. Mapa de lineamientos a escala local para cuenca del río Piedras. Creación propia	42
Fig. 14. Diagrama de rosas para los lineamientos a escala local. Creación propia con el software Visible Geology.	43
Fig. 15. Histograma de frecuencia acumulada para la longitud de los lineamientos por categorías.	44
Fig. 16. Histograma de frecuencia acumulada con orientación preferencial de lineamientos.	44
Fig. 17. Mapa de la temperatura superficial del suelo (LST) en grados centígrados (°C) para el año 2016.	46
Fig. 18. Mapa de la temperatura superficial del suelo (LST) en grados centígrados (°C) para el año 2020.	48
Fig. 19. Zonas de descarga de la cuenca del río Piedras determinada mediante anomalías térmicas junto con zonas potenciales de recarga (Villada, 2021, en construcción).	51
Fig. 20. Mapa de área de influencia de los nacimientos correspondientes a los drenajes de primer orden y su coincidencia con las zonas de descarga hídrica identificadas en esta investigación.	52
Fig. 218. Modelo conceptual de flujo local en tercera dimensión de la cuenca del río Piedras.	54

1 INTRODUCCIÓN

Las zonas potenciales de recarga (ZPR) y de descarga (ZPD) de aguas subterráneas son variables importantes para la definición de un sistema de flujo regional de agua subterránea teniendo en cuenta que marcan el inicio y el fin del curso del agua; por lo tanto, son indispensables para la generación de un modelo hidrogeológico conceptual. Un sistema de flujo de aguas subterráneas se puede presentar en forma de bloque diagrama (Gillespie, Nelson, Mayo et al., 2012) y se usa como herramienta indispensable en la elaboración de planes de gestión del recurso hídrico.

La descarga de aguas subterráneas se encuentra donde fluye el agua subterránea hacia la superficie del suelo o donde la capa freática se cruza con la superficie de la Tierra (Sass, 2013). Un ejemplo son las zonas húmedas o los manantiales que se originan debido a las características geomorfológicas o debido a cambios litológicos. Adicionalmente, las zonas de descarga también pueden ser producto de fenómenos tectónicos o estructurales (Alfaro et al., 2006). Así mismo, la descarga de aguas subterráneas puede ocurrir en lugares muy específicos, en extensiones de áreas pequeñas de unos cuantos metros como en los manantiales (Sass, 2013).

El análisis de terreno en forma digital se ha utilizado ampliamente para el estudio de la geología del subsuelo y de esta manera conocer los tipos de roca, las estructuras producidas por la actividad tectónica, la composición de macizos rocosos, así como también, el análisis de los rasgos topográficos y su relación con los fenómenos tectónicos y estructurales (Ríos et al., 2012). Las técnicas de teledetección en imágenes captadas por satélites pueden utilizarse para evaluar los recursos hídricos subterráneos y entre estos, las zonas de descarga hídrica de acuíferos.

Desde los años 70 se vienen enviando misiones espaciales con satélites capaces de captar imágenes en diferentes resoluciones de la Tierra. El satélite de observación terrestre Landsat 8 es una de las misiones de satélites espaciales organizadas por la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y el USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos). Dicho proyecto se encuentra operando desde el año 2013 hasta la actualidad y una de sus novedades es la incorporación de instrumentos como el sensor térmico infrarrojo (TIRS) que permite obtener imágenes térmicas (correspondiente a las bandas 10 y 11) con una resolución espacial de 100 m; bandas de las cuales se extraen imágenes que son utilizadas en estudios hidrogeológicos para obtener temperaturas cercanas a las de la superficie terrestre.

La idea de usar el calor como un trazador de aguas subterráneas es antigua (Huntley, 1978). Se basa en la observación general en que la descarga de agua subterránea, desde el suelo, tiene una contrastante firma de calor en comparación con las áreas circundantes (Sass, 2013); de la misma forma que el agua subterránea tiene una firma térmica distinta a la de las aguas superficiales. La detección de zonas de descarga hídrica a través de las imágenes térmicas es

posible en cualquier entorno donde haya un contraste térmico significativo entre la descarga por fluido de poros y el cuerpo receptor de agua superficial (Tamborski et al., 2015).

Actualmente en la Escuela de Ciencias de la Tierra de la Universidad EAFIT se están desarrollando investigaciones para aportar al campo del conocimiento en hidrogeología, un ejemplo de esto es la investigación desarrollada en el proyecto de grado de Isabel Cristina Villada Arias estudiante de la Maestría en Ciencias de la Tierra; en el cual, se identifican zonas potenciales de recarga para una región del suroeste antioqueño en Colombia, este trabajo de maestría a su vez contiene el área de estudio de esta investigación para este trabajo de grado, la cual está ubicada en la cuenca del río Piedras en el municipio de Jericó, Antioquia. Con la ayuda de imágenes satelitales térmicas, parámetros geomorfológicos y sistemas de información geográfica, se logró identificar las zonas de descarga en el área de interés y con ello se elaboró un modelo tridimensional preliminar del sistema local de flujos para la cuenca del río Piedras.

2 GENERALIDADES

2.1 Pregunta de investigación

¿Se pueden definir zonas de descarga con el uso de imágenes satelitales térmicas TIR y apoyado en análisis geomorfológicos y estructurales de forma digital?, A partir de esto, ¿Es posible construir una aproximación a un modelo conceptual del sistema de flujo local en cuencas hidrográficas tropicales particularmente en la del río Piedras?

2.2 Hipótesis

Las anomalías térmicas detectadas en las imágenes TIR que se logran observar entre la temperatura del agua subterránea, los cuerpos de agua superficial y el suelo, suelen ser contrastantes y validadas con rasgos topográficos, geomorfológicos y estructurales que permiten delimitar áreas de descarga. Además, dichas zonas pueden ser integradas con zonas potenciales de recarga, y de esta forma definir, flujos regionales, como también flujos locales de agua subterránea.

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo general

Delimitar zonas de descarga de aguas subterráneas para la cuenca del río Piedras con el uso de imágenes térmicas, geomorfología y estructuras.

2.3.2 Objetivos específicos

- Evaluar los rasgos geomorfológicos y tendencias estructurales del área de interés a partir del Modelo Digital de Elevación con resolución de 10 m.
- Aplicar técnicas de procesamiento de imágenes satelitales térmicas para definir la temperatura superficial del suelo LST y hallar anomalías térmicas asociadas a zonas de descarga de agua subterránea.
- Determinar por medio de 2 matrices que corresponden a la importancia relativa y al porcentaje de importancia en peso (método heurístico) de las diferentes variables o modelos de terreno que se usaron para delimitar zonas de descarga hídrica.
- Combinar las zonas de descarga identificadas y retomar las zonas potenciales de recarga provenientes del trabajo de maestría que enmarca este proyecto de grado, para la construcción de un modelo preliminar y conceptual de flujos de agua subterránea de la cuenca de estudio.
- Validar el mapa zonas de descarga propuesto por el método heurístico con el mapa de inventario de nacimientos generados a partir de la red de drenajes de primer orden otorgada por la cartografía básica del IGAC.

3 ÁREA DE ESTUDIO

Para determinar el área de estudio se evaluaron aspectos como; la disponibilidad de información disponible, las diferentes cuencas contenidas dentro del área del estudio del proyecto de maestría previamente señalado en el que se enmarca este trabajo de grado. La cuenca del río Piedras fue de gran interés desde el principio, debido a la disponibilidad de información que se tenía , ya que se desarrolló un proyecto de una pequeña central hidroeléctrica, que se alimenta de mismo río de la cuenca, Además se está planeado un proyecto de explotación de cobre llamado Quebradona que también suministra información útil.

3.1 Localización

El área de estudio se encuentra ubicada en el municipio de Jericó al suroeste Antioqueño, limitando al norte con el municipio de Tarso y el río Cauca, al occidente con los municipios de Andes y Pueblorrico, al sur con el municipio de Jardín y por último al oriente con el municipio de Támesis. El río Piedras nace en la vertiente oriental de una de la cordillera occidental de Colombia recibe las aguas de las quebradas Roblal, La Palma y Quebradona. Finalmente, desemboca en el río Cauca.

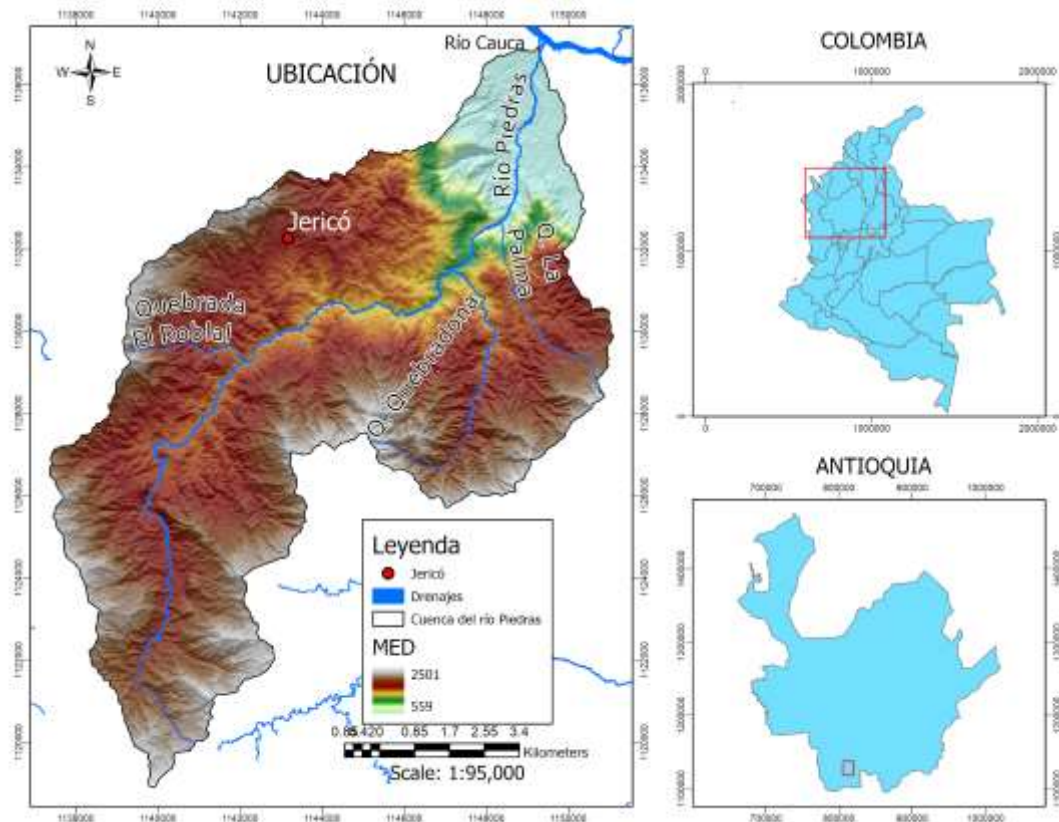


Fig. 1. Mapa de ubicación de la cuenca del río Piedras en Jericó, Antioquia. Creación propia.

3.2 Variación de temperaturas en la zona

La zona presenta temperaturas por encima de los 18° C en el día hasta alrededor de los 27° C; aunque en la noche se pueden experimentar temperaturas de hasta 15°C. En términos generales, el clima del área de estudio es muy variable debido a que la cuenca del río Piedras presenta microclimas por el cambio de elevación que va desde los 2500 msnm en cercanías al “Alto de las Nubes” hasta los 559 msnm en la desembocadura del río Cauca (Integral, 2019).

3.3 Geometría de la cuenca del río Piedras

La siguiente tabla contiene los parámetros medidos para la cuenca con base en los datos geográficos adquiridos y procesados en ArcGIS 10. Fue de ayuda para el estudio conocer estos parámetros morfométricos pues nos facilita entender las dimensiones de la cuenca hidrográfica en la cual se desarrolla todo el trabajo de grado.

Tabla 1. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Piedras. Creación propia.

Área (km ²)	Longitud Cauce principal (km)	Longitud axial (km)	Pendiente media (grados)	Altura media (msnm)	Perímetro (km)	Pendiente del drenaje principal (grados)
113.81	56	20.34	22,66	1922,27	62.10	1.75

3.4 Geología

3.4.1 Geología regional

El área de estudio se encuentra dentro del marco de la plancha 166 Jericó, a excepción de una pequeña área al sur de la cuenca que hace parte de la plancha 186 Riosucio (Fig. 3), ambas planchas geológicas están en escala 1:100.000 y fueron generadas por el SGC.

A continuación, se describen las unidades geológicas regionales de la zona de estudio (ver Tabla 2.), así como también el código con que aparecen en las planchas geológicas nacionales, edad cronoestratigráfica, los diferentes miembros descritos por el geólogo Alemán Emil Grosse en 1926; así como también el geólogo Colombo-Neerlandés Thomas Van Der Hammen en 1958 y esencialmente las litologías.

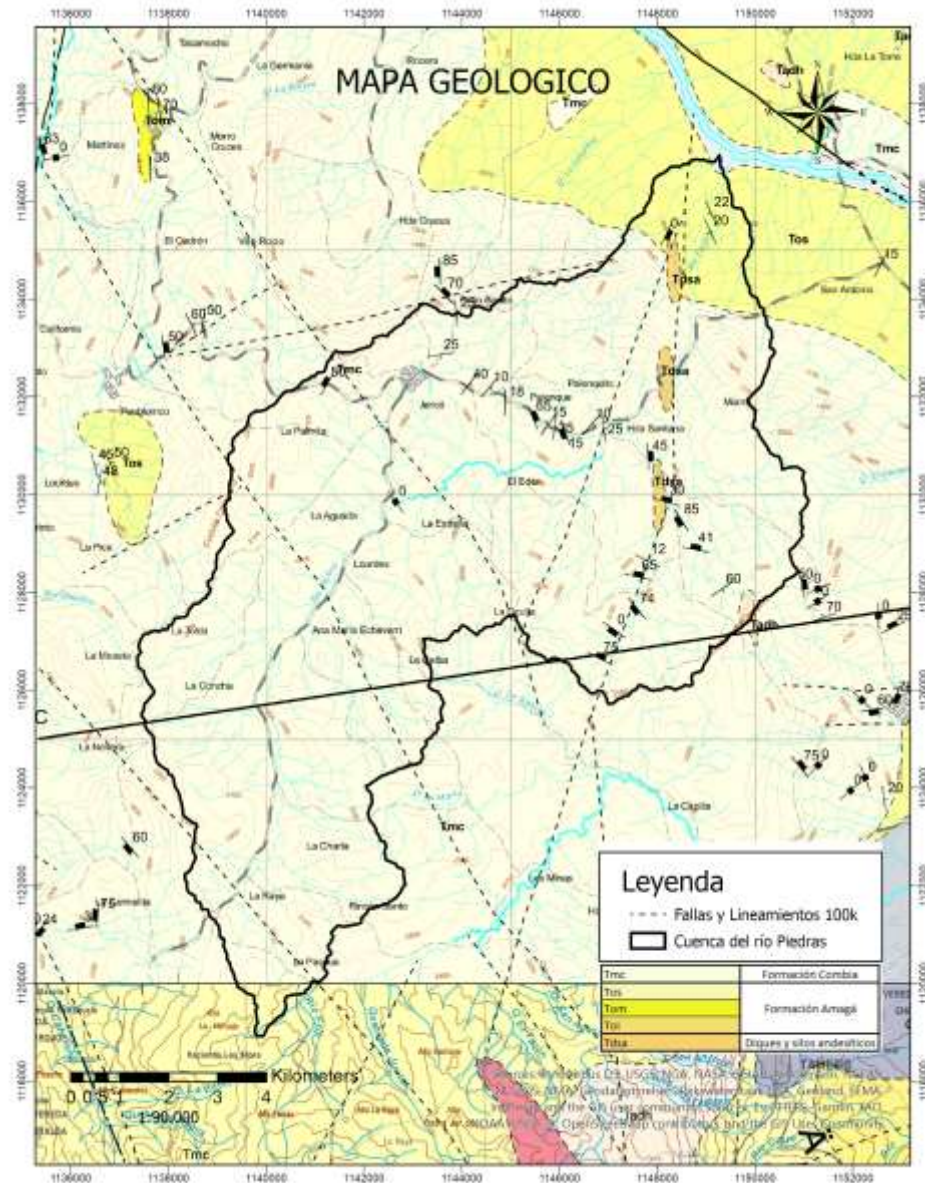


Fig. 2. Mapa de la Geología regional, basado en las planchas 166 Jericó y 186 Riosucio elaborado por Calle, B., y González, H. (1980)

Tabla 2. Unidades geológicas regionales.

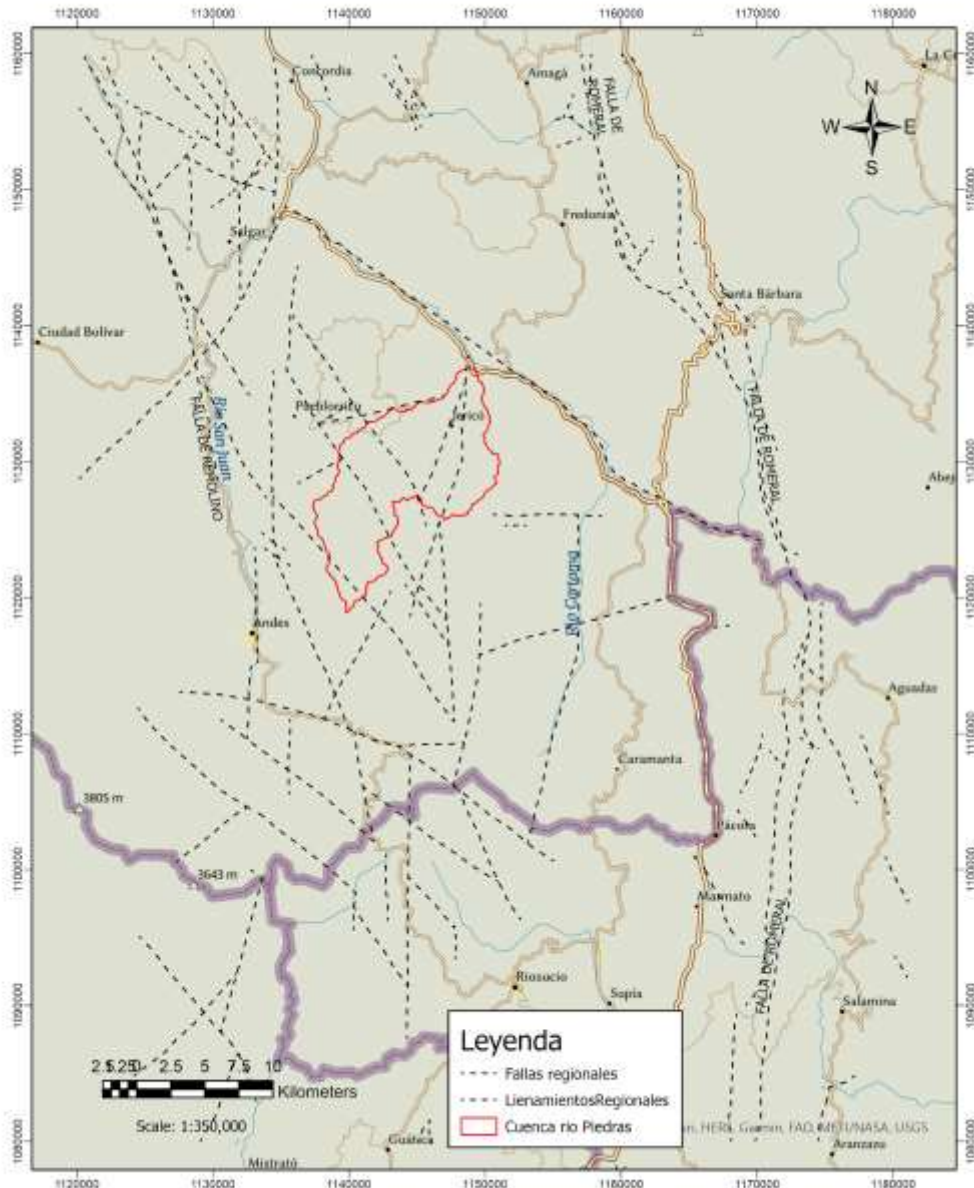
Nombre	Código	Miembro/ Observaciones	Edad	Litología
Formación Combia	Ngas	Superior	Plioceno	También llamado miembro sedimentario predomina estratos mal cementados y conglomerados con cantos redondeados y tamaños variables de composición basáltica, y algunos estratos de cenizas.

Nombre	Código	Miembro/ Observaciones	Edad	Litología
		Inferior	Mioceno	También denominado miembro volcánico consiste en conglomerados de matriz tobácea, shales de color crema y areniscas tobáceas, tobas de cristal, tobas de cenizas, aglomerados, brechas volcánicas y derrames de andesita y basalto.
Formación Amagá	Tmc (clasificación por Grosse en 1926.)	Superior	Oligoceno	Abundancia de areniscas de color verdosa y arcillas de color ocre.
		Medio	no superior -	Mantos explotables y algunos no tan explotables de carbón.
		Inferior	Mioceno Inferior	Aglomerados polymícticos, areniscas de grano grueso de color claro y matriz arcillosa.
Rocas Hipoabisales porfiríticas	Tdsa	Suelen aflorar en quebradas afluentes al río Piedras.		Composición intermedia como Andesitas y micro diorita, se diferencia de las Andesitas de la Formación Combia por el tamaño de los cristales de hornblenda, feldespato, biotita y cuarzo.
Depósitos cuaternarios	Qal Y Qdv	Depósitos de vertiente y aluviales.	Cuaternario reciente	Depósitos mal consolidados y en ocasiones saturados.
Terrazas y llanuras aluviales		Asociadas al río Cauca, sus extensiones varían desde 50 a 100 m ²		Conglomerados compuestos 70% de clastos angulares a subangulares de pórfidos, areniscas, basaltos, granitos, y 30% de matriz compuesta de arena media, fina, gruesa y muy gruesa.
Depósitos de vertiente	Qdv	Acumulaciones de material heterogéneo con espesores de hasta 6 m		Depósitos con una relación clasto/matriz 80/20 los clastos poseen tamaños de 1 cm a 50 cm en una matriz de arena fina a limo-arcilloso

3.4.2 Geología estructural

A continuación, se describen las estructuras regionales relevantes asociadas a la zona de estudio, las cuales ejercen un control estructural en los alrededores de la cuenca, cauces de algunas de las quebradas y ríos de la zona, las tendencias estructurales de los lineamientos regionales son NW-SE y en algunos casos NE-SW tendiendo a N-S (Fig. 3).

ESTRUCTURAS REGIONALES



3.4.2.1 Falla Romeral

Las estructuras de la zona de estudio del flanco este de la Cordillera Occidental y la parte central del valle encañonado del río Cauca corresponden al Sistema de Fallas de Romeral que juega un papel importante en la acreción de rocas cretácicas en el núcleo cristalino de la Cordillera Central (Álvarez, 1979). En la expresión más al occidente de este sistema de fallas, se encuentra la Falla Remolino que se ubica entre las fallas Romeral y Sabanalarga de orientación similar. Además, Grosse en 1926, menciona que esta serie de estructuras asociadas a la orogenia Andina presentan direcciones preferenciales NW y NE buzando al E y con grandes

desplazamientos verticales. Estudios posteriores afirman que la Falla de Romeral marca el límite entre la corteza oceánica al occidente, conformada por las rocas de la Cordillera Occidental y la corteza continental al oriente (Carmona et al., 2005).

3.4.2.2 Falla Remolino

La estructura fue definida con base a las deformaciones que presentaban las rocas volcánicas y cherts en las cercanías de la localidad del Remolino. Su dirección es N10W a N20W y debido a esto también se podría asociar como una traza de la falla Mistrató que tiene una dirección similar (Calle et al., 1980).

3.4.2.3 Lineamientos

En cuanto a los lineamientos, estos presentan dos marcadas tendencias regionales: la primera con dirección N-S, subparalela al rumbo de la Falla de Mistrató; y la segunda orientada N50°-60°W, cuya orientación es subparalela al Lineamiento de Arma (Calle et al., 1980).

3.4.2.4 Plegamientos

Las expresiones geomorfológicas más importantes son los anticlinales y los sinclinales asociados a la Formación Amagá durante las erupciones volcánicas en el Terciario Superior; un ejemplo de ello es “Cerro Bravo” que es una de las expresiones geomorfológicas más sobresalientes del área circundante como también un anticlinal que lleva su mismo nombre.

Posterior a los eventos de plegamientos y tal vez antes del volcanismo del Terciario Superior hubo una actividad volcánica muy fuerte que imprimió características de bloques fallados donde rocas paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas están en contacto fallado, evidenciándose en los basaltos de la Formación Combia que aflora en la carretera cercana a Jericó (Grosse, 1926).

3.4.3 Geología local

Las rocas presentes en el área son de edades entre el paleógeno y neógeno; corresponden a rocas vulcano-sedimentarias, sedimentarias e ígneas con texturas porfídicas que afloran en toda el área formando cuerpos aislados (SHI, 2014). En el mapa (Fig. 2.) el polígono de color hueso representa la Formación Combia, el polígono de color amarillo pálido son las rocas de la Formación Amagá, en naranja pálido cuerpos aislados hipoabisales, en gris depósitos cuaternarios fluviales asociados al río Cauca y en marrón diques y silos andesíticos. Cabe mencionar que toda la información aquí consignada sobre la geología local no fue una adquisición hecha en jornadas de campo por el equipo de este trabajo de grado, sino que fue extraída de estudios previos del Servicio Geológico Colombiano (SGC).

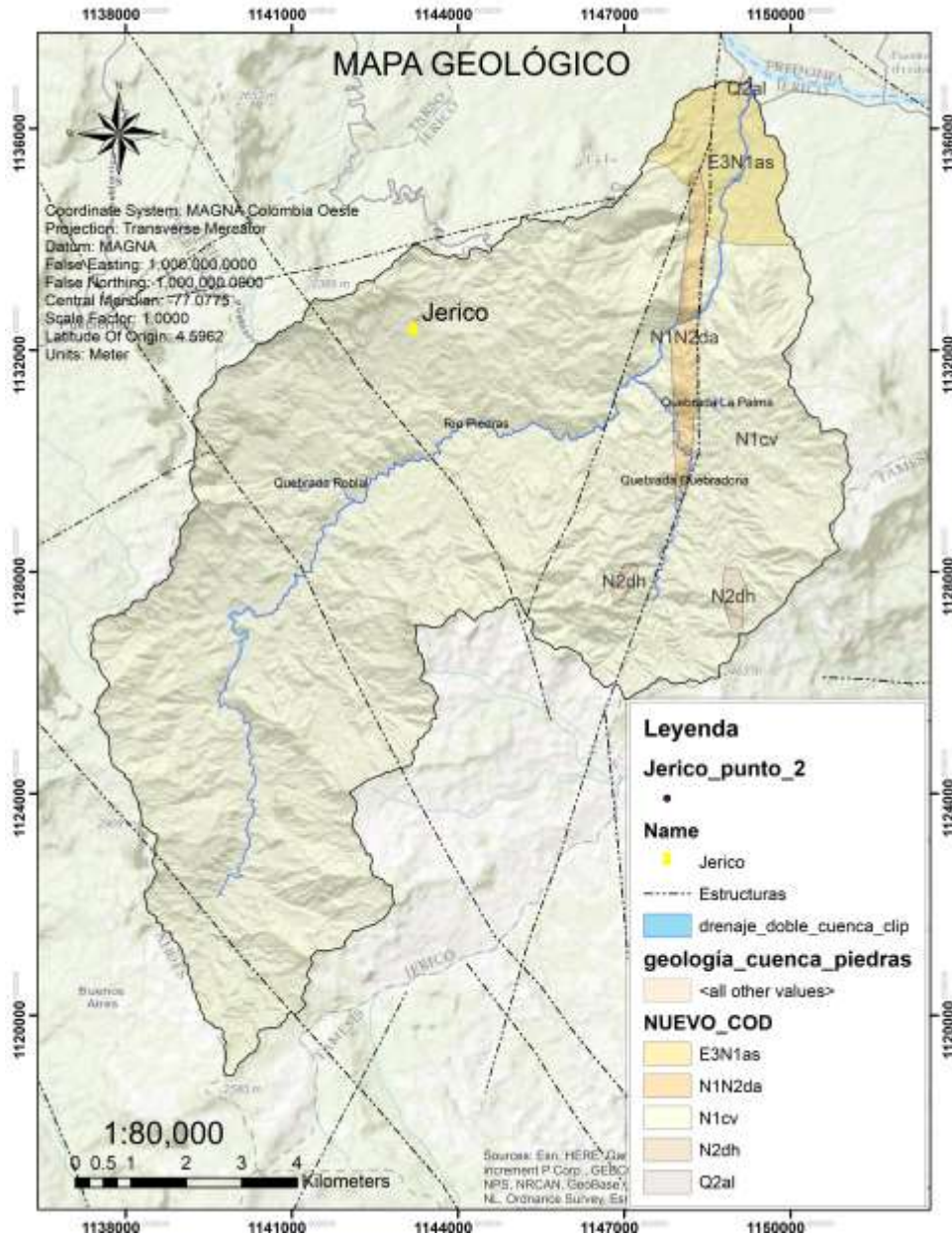


Fig. 3. Mapa geológico local para la cuenca del río Piedras. Donde E3N1as corresponde a el miembro superior de la Formación Amagá, N1N2da diques y silos andesíticos, Q2al depósitos aluviales cuaternarios, N1cv Formación Combia y N2dh son pórfidos andesíticos.

Las características granulométricas, texturales y estructurales de las formaciones rocosas condicionan valores como la capacidad de almacenamiento de agua en las unidades geológicas; también, la geomorfología influye en la determinación de inferir zonas preferenciales de recarga y descarga (SHI, 2014).

3.5 Geomorfología

Para la descripción geomorfológica se utilizó la propuesta de Carvajal (2008) que consiste en una descripción geomorfológica de la zona desde una escala mayor a una escala menor según las siguientes categorías.

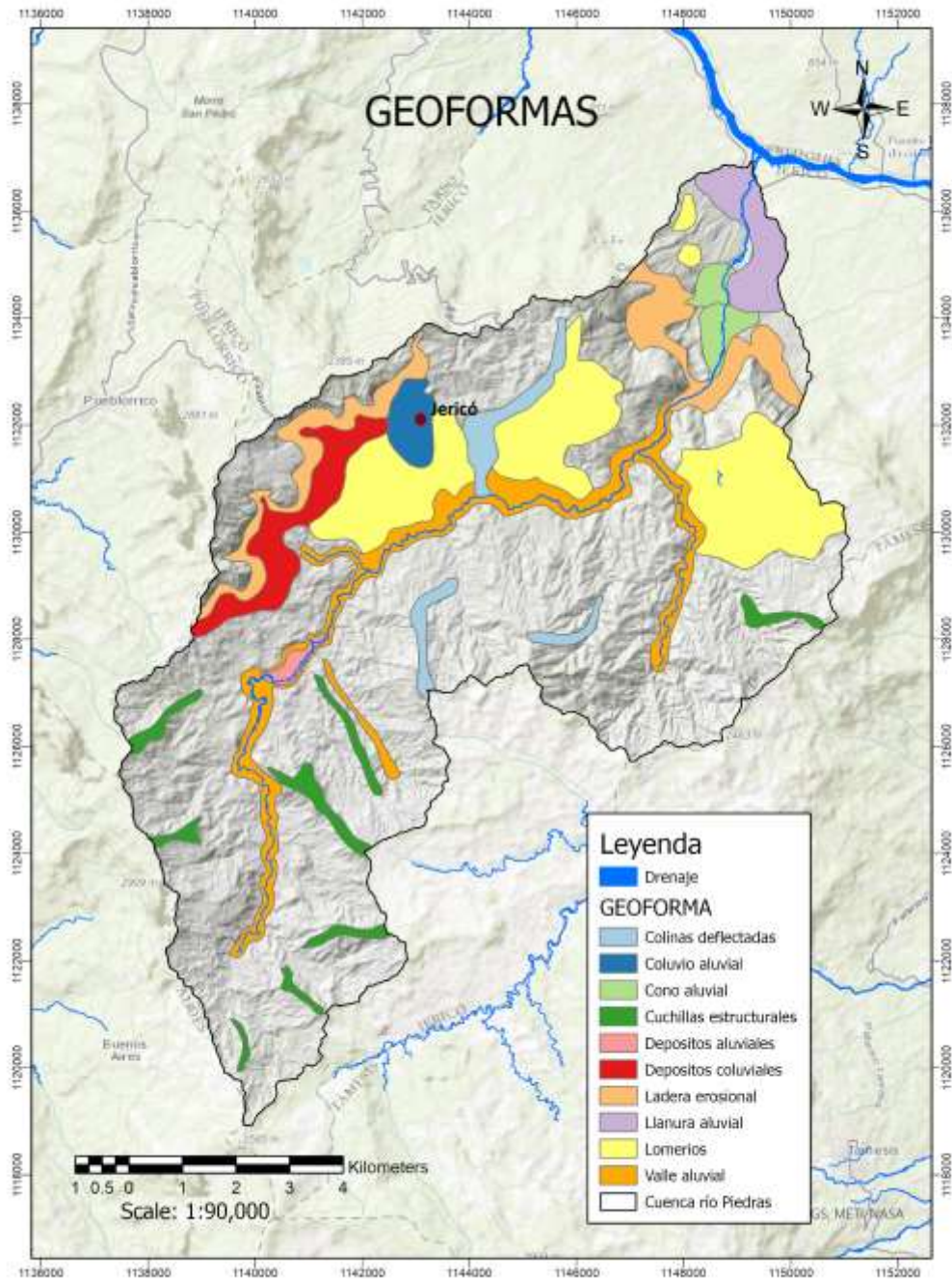


Fig. 4. Mapas geomorfológicos de la cuenca del río Piedras. creación propia.

Tabla 3. Descripción geomorfológica desde la escala más regional hasta la propia cuenca del río Piedras. Escalas propuestas según Carvajal, 2008.

Jerarquía	Descripción
Geomorfoestructura	Escala de <1:2.500.000 y 1:1.500.000, Se encuentra en medio del sistema orogénico Andino correspondiente a una zona de convergencia de placas tectónicas forma un arco continental activo.
Provincia geomorfológica	Escala entre 1:1.000.000 y 1:500.000 Se encuentra en el flanco oriental de la cordillera occidental de Colombia, esta unidad se delimita por trazos de mega fracturas y suturas definidas o inferidas (EIA, Minera de cobre Quebradona, 2019).
Región geomorfológica	Escala entre 1:250.000 y 1:500.000 Se delimitan tres ambientes morfogenéticos: denudacional, estructural y fluvial. El primero se encuentra en la parte alta de la cuenca, el segundo en la zona más baja donde hay pendientes más pronunciadas y el tercer ambiente se relaciona con la actividad de los ríos Piedras y Cauca (EIA, minería de cobre Quebradona, 2019)
Unidad Geomorfológica	Escala local <1:250.000 Las formas que se observan en la zona de estudio son resultados de procesos de compresión y plegamiento de los estratos presentes en conjunto con la actividad volcánica que cubrió la zona durante el Holoceno. Además, el relieve ha sido modificado debido a los procesos denudativos y estructurales. Por otro lado, la influencia de los drenajes pertenecientes a la cuenca y el río cauca son responsables de las formas propias de ambientes fluviales (EIA, minería de cobre Quebradona, 2019)

4 Glosario

4.1 Descarga de aguas subterráneas

Es un fenómeno natural donde el agua subterránea fluye hacia la superficie de la tierra o donde el nivel freático se intercepta con la topografía. Las zonas de descarga se ubican usualmente desde el punto de vista topográfico en las áreas bajas recibiendo los flujos regionales. Sucede de forma puntual en forma de manantiales o en áreas extensas como humedales (G.Z. Sass, 2014).

4.2 Recarga de aguas subterráneas

Se entiende como la entrada de una zona insaturada a una zona saturada debajo del nivel freático junto con el movimiento asociado fuera del nivel freático dentro de la zona saturada (S.Deppa, 2016).

4.3 Sistemas de Información Geográfica y su uso en el modelamiento de las aguas subterráneas

Las técnicas SIG facilitan la integración y el análisis de grandes volúmenes de datos como puntos de agua, accidentes geográficos, geología y cobertura terrestre, (Solomon S. y Quiel F., 2006).

Existen varios factores como; la cobertura vegetal, topografía, geología, lineamientos, patrones de drenaje, usos del suelo, pendientes, entre otros, que se pueden evaluar por medio de los SIG y con la elaboración de mapas temáticos llegar a identificar zonas potenciales de recarga y de zonas de descarga (S.Deppa, 2016).

4.4 Sensores remotos usados en la identificación de zonas de descarga de aguas subterráneas

Para el estudio del subsuelo existen herramientas como la geoelectrónica, sísmica de refracción y sondeos magnéticos, sin embargo, los sensores remotos provenientes de plataformas satelitales, aeroplanos, drones, et., se obtienen imágenes de diversa índole de la superficie y la atmósfera del planeta tierra. Por lo anterior, la forma en que los sensores remotos pueden aportar al modelamiento de aguas subterráneas es múltiple; un ejemplo de ello puede ser la delimitación de un acuífero gracias a la identificación de diques y fallas que pueden condicionar la forma en que fluye el agua dentro del acuífero (P. Brunner, 2007).

Entre los satélites que están en la órbita terrestre existen aquellos que tienen incorporados sensores capaces de medir la radiación infrarroja térmica expedida por la superficie terrestre y de esta manera poder identificar anomalías térmicas.

4.5 Misiones LANDSAT e imágenes TIR

El satélite LANDSAT 8 tiene incorporada dentro de sus instrumentos el **Thermal Infrared Sensor**, conocido como TIRS que es el sensor capaz de captar estas frecuencias del espectro electromagnético emitidas por la tierra perteneciente al infrarrojo que se divide a su vez en varios subsistemas con diferentes bandas, resoluciones espectrales y resoluciones espaciales (ver tabla 4). Las imágenes TIR corresponden a las bandas 10 y 11 del sensor LANDSAT 8 con una resolución espectral de 10,60 a 12,51 micrómetros y resolución espacial de 100 metros. Estas imágenes son las usadas en estudios para obtener temperaturas cercanas a las de la superficie por medio de las bandas 4, 5 y 10. Finalmente, estas imágenes se

pueden descargar de manera gratuita desde las páginas de Internet Glovis y Earth Explorer del USGS.

Tabla 4. Resoluciones espectrales y espaciales de las diferentes bandas del Landsat 8. Fuente: USGS

Landsat-8 OLI and TIRS Bands (μm)		
30 m Coastal/Aerosol	0.435 - 0.451	Band 1
30 m Blue	0.452 - 0.512	Band 2
30 m Green	0.533 - 0.590	Band 3
30 m Red	0.636 - 0.673	Band 4
30 m NIR	0.851 - 0.879	Band 5
30 m SWIR-1	1.566 - 1.651	Band 6
<i>100 m TIR-1</i>	<i>10.60 – 11.19</i>	Band 10
<i>100 m TIR-2</i>	<i>11.50 – 12.51</i>	Band 11
30 m SWIR-2	2.107 - 2.294	Band 7
15 m Pan	0.503 - 0.676	Band 8
30 m Cirrus	1.363 - 1.384	Band 9

5 METODOLOGIA

Para el presente trabajo se llevó a cabo una metodología dividida en cuatro etapas principales: Recopilación de datos, procesamiento, análisis estadístico y caracterización geomorfológica (Fig. 4) A continuación se realizó una breve descripción de cada etapa.

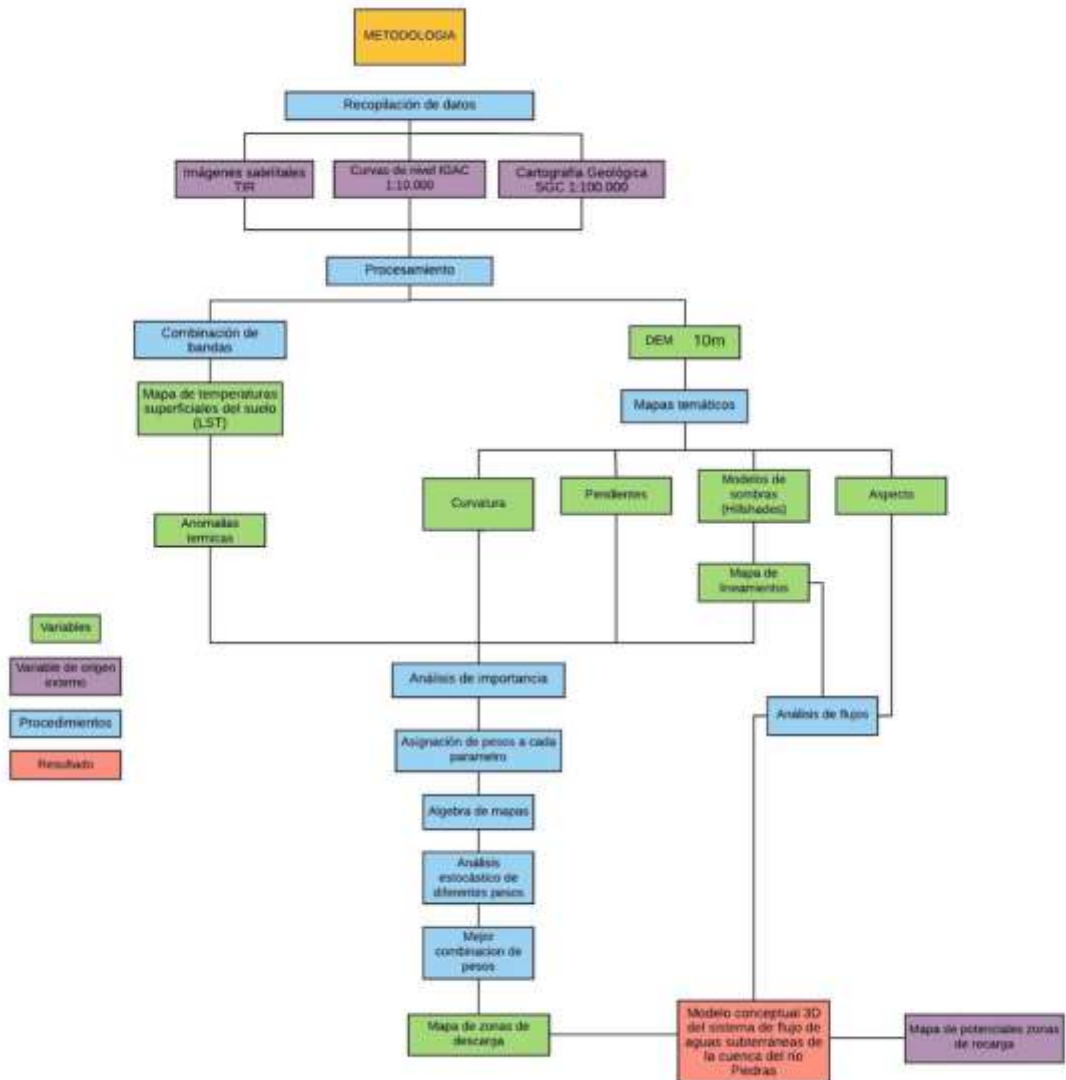


Fig. 5 flujograma del proceso metodológico.

5.1 Recopilación de datos

En esta primera etapa se inició la investigación bibliográfica digital sobre metodologías relacionadas con la construcción de mapas térmicos y su relación con la hidrogeología; más concretamente con las zonas de descarga y como estas zonas son variables primordiales para plantear modelos hidrogeológicos conceptuales.

Partiendo de la zona de estudio, investigación bibliográfica y el planteamiento de la hipótesis, el paso siguiente fue la recopilación de las variables necesarias para aplicar las metodologías de la investigación. Los datos principales incluyen:

- Imágenes térmicas (TIR) del satélite Landsat 8 con una temporalidad diurna adquiridas entre las 15:00 y 16:00 horas, en el mes de enero que corresponde a una época seca en Colombia.
- Curvas de nivel de la cartografía básica del IGAC en escala 1:10.000 con el fin de que sirvieran para generar un Modelo de Elevación Digital – MED de mayor calidad con respecto a los MED disponibles en Alaska Satellite Facility producido por el satélite AlosPalsar que son de resolución espacial de 12.5 m pero partiendo del hecho que estas curvas de nivel estaban incompletas en algunas partes debido a que son extraídas de fotos aéreas, fueron completadas a través de digitalización manual empleando datos de sensores remotos.
- La cartografía geológica a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC) de la zona de estudio.

5.2 Procesamiento

Las técnicas SIG facilitan la integración y el análisis de grandes volúmenes de datos como puntos de agua, accidentes geográficos, geología y cobertura terrestre, (Solomon S. y Quiel F., 2006). Los datos geográficos tales como; curvas de nivel y red de drenajes, fueron adquiridos para la zona de estudio, pasaron por una etapa de procesamiento con el fin de generar el MED a partir del cual se van a construir los diferentes mapas temáticos. Adicionalmente, información geográfica como la delimitación de la cuenca, drenajes y otros mapas temáticos que se desarrollaron fueron de ayuda para los análisis de los resultados obtenidos en los mapas de temperatura producto del procesamiento de las imágenes térmicas.

5.2.1 Modelo de Elevación Digital (MED)

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, es la institución oficial colombiana encargada de producir la cartografía básica del territorio. Dentro de esta cartografía publicada existe para el Departamento de Antioquia, planchas topográficas a escala 1:10.000; las cuales contienen información geográfica entre la que se destacan los drenajes sencillos y dobles, vías, construcciones, curvas de nivel, entre otros, siendo las curvas de nivel el recurso geográfico requerido para la generación de Modelos de Elevación Digital por medio de la herramienta TopoToRaster. No obstante, debido a que las imágenes de las fotografías aéreas de donde se generan las curvas de nivel presentaban nubes, como se mencionó anteriormente, existen áreas de curvas incompletas, se digitalizaron las partes faltantes por medio de un

SIG (ArcGIS 10); ya que ese software ofrece un entorno amigable y su uso es muy difundido.

Para ayudar con la digitalización manual de las áreas faltantes fueron usadas las curvas de nivel obtenidas de un MED con resolución espacial de 12,5 m obtenido del satélite Alos Palsar descargado de la página Alaska Satellite Facility (ASF). Una vez completadas las curvas de nivel se obtuvo un MED de resolución de 10 metros; el cual fue empleado para la elaboración de modelos digitales de terreno como: pendientes, aspecto, sombras, curvatura, lineamientos y perfiles topográficos.

5.2.2 Mapas temáticos y Modelos

Para el desarrollo de los modelos digitales de superficie en ArcGIS 10, se empleó el MED con resolución espacial de 10 metros, generado anteriormente, como la variable principal en cada una de las herramientas utilizadas para producir automáticamente las superficies del relieve.

5.2.2.1 Mapa de Pendientes

En el caso de las pendientes, la herramienta utilizada fue “Slope”; la cual representa la tasa de cambio de elevación para cada celda del Modelo de Elevación Digital (MED), su resultado es un raster de pendientes que está expresado en porcentaje con un rango de valores determinado por los investigadores dependiendo de la finalidad. Para este estudio en particular se utilizó la clasificación de la Unión Temporal Estudios Ambientales y Planificación Territorial del río Guarinó (2015) que consta de 7 clases: Plano (0-3%), ligeramente inclinado (3-7%), moderadamente inclinado (7-12%), Fuertemente inclinado (12-25%), ligeramente escarpado (25-50%), moderadamente escarpado (50-75%) y fuertemente escarpado (>75%) (IGAC, 1992). Posteriormente se estimó el área total de cada categoría y su relevancia en relación con las zonas de descarga. Este procesamiento también fue hecho para las otras variables geomorfológicas como el Mapa de Aspecto y Mapa de Curvatura.

5.2.2.2 Mapa de Aspecto

En cuanto a la dirección de las laderas o mapa de aspecto se emplea la herramienta “Aspect”; que visualiza la orientación en ángulos horizontales con respecto al norte, generando valores en un modelo donde se muestra para cada punto cardinal un color correspondiente. El mapa de aspectos o de orientación de las laderas ayuda a entender la dirección de los flujos de agua superficial y subsuperficial dentro de la cuenca de estudio.

5.2.2.3 Mapa de Curvatura

La curvatura, considerada como la segunda derivada de la pendiente, visualiza la forma de ésta, determinando si la superficie es cóncava donde los flujos de agua son convergentes, convexa cuando los flujos de agua divergen y superficies planas en las que los flujos son más estáticos con respecto a las curvaturas mencionadas anteriormente. Al igual que los demás modelos, el resultado de este procesamiento es un archivo ráster en píxeles con un rango de valores, no obstante, con el propósito de facilitar la interpretación y el manejo de los datos se llevó a cabo la reclasificación de estos valores empleando la herramienta “Reclassify” en las

siguientes 3 clases: cóncava, convexa y plana con los valores numéricos 1, 2 y 0 respectivamente.

5.2.2.4 Modelos de Sombras

Para el desarrollo del modelo de sombras se aplica la herramienta “Hillshade”. Esta herramienta crea una representación en 3D y escala de grises de la superficie teniendo en cuenta el ángulo de incidencia del sol. Se desarrollaron ocho modelos diferentes de sombras con diferentes ángulos de incidencia del Sol (0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 y 315), con el fin de asegurar la extracción de la mayor cantidad de lineamientos posibles para la zona de estudio a escala 1:10.000 (Das S, et al., 2019).

5.2.2.5 Mapas de lineamientos

Se realizó la digitalización de los lineamientos usando el software PCI Geomática versión 2016 para procesamiento de imágenes ráster de sombras, dicho software contiene un algoritmo llamado “LINE” que extrae lineamientos con rangos de longitudes determinadas por el usuario. Posteriormente se llevó a cabo la depuración manual de los trazos que no eran considerados estructuras reales debido a que en algunas ocasiones el algoritmo tomaba cambios repentinos del color de la imagen como posibles estructuras; además, se eliminaron las estructuras relacionadas con actividades antrópicas como carreteras, cultivos, urbanizaciones, entre otros. Una vez depurado, se tomaron los datos más coincidentes en cada modelo de sombras, analizando las tendencias, longitudes y la concentración de lineamientos en zonas determinadas para en esta cuenca en específico.

Finalmente, el mapa de lineamientos obtenido para la totalidad del área de estudio del trabajo de maestría referenciado anteriormente fue recortado para dejar solamente los lineamientos contenidos dentro del polígono perteneciente a la cuenca hidrográfica del río Piedras.

Con el fin de determinar rangos para cada lineamiento respecto a sus alrededores, se utilizó la herramienta buffer que permite definir polígonos de influencia para cada vector según una distancia determinada. Para este caso de estudio se generaron como una forma de experimentación los siguientes rangos: 0 a 15m, 15-30m y 30-45m como cerca, moderadamente cerca y distantes respectivamente.

5.3 Mapas de temperatura de superficie (LST)

Para la obtención de los mapas “Land Surface Temperature” (LST), lo primero que se hizo fue la adquisición de las imágenes satelitales térmicas bajo ciertos parámetros que serán mostrados a continuación:

5.3.1 Adquisición de imágenes térmicas

La zona de estudio presenta una variabilidad anual bimodal caracterizada por dos periodos; donde su primer periodo seco en el año es entre los meses de diciembre a febrero y su segundo periodo seco es de junio a agosto. Las imágenes satelitales térmicas que se utilizaron fueron extraídas del satélite Landsat 8 tomadas en los meses de enero y julio, correspondientes a periodos secos y permitió que las anomalías térmicas fueran más contrastantes entre el agua subterránea y el agua superficial, suelo, vegetación, y litología. Debido a que los grandes contrastes entre

la temperatura del agua subterránea y la temperatura superficial son más fáciles de observar en las épocas más frías, como también en las más cálidas del año donde las temperaturas superficiales son contrastantes (Barron et al., 2009).

5.3.2 Parámetros predefinidos para la adquisición de las imágenes térmicas

Se procedió a organizar parámetros que permitieron la mejor adquisición de imágenes satelitales. Como se explicó, se escogió el mes de enero como el más apropiado para la investigación; además, los años que se decidió trabajar fueron el 2016 y 2020 debido a que fueron periodos Niño. Con el fin de obtener mejores comparaciones entre las anomalías térmicas en diferentes periodos de tiempo, uno de los parámetros que hubiesen sido ideales es la hora de la adquisición de las imágenes satelitales corresponde al rango de tiempo entre las 6:30 pm a 8:30 pm debido a que en este horario los efectos de la cubierta terrestre sobre las temperaturas de la superficie se minimizan (Barron y Van Niel, 2009). Sin embargo, la zona no cuenta con imágenes satelitales nocturnas, por lo que el horario único disponible es alrededor de las 3:00 pm. En definitiva, se tomaron 2 imágenes térmicas de los 2 años mencionados, que al compararlas permite tener un diagnóstico más confiable.

Otra característica ideal para las imágenes satelitales adquiridas es que en la parte del área de estudio estas tuviesen poca o ninguna nubosidad pues esto puede afectar los resultados esperados como se verá más adelante en la sección discusión sobre como la nubosidad afectó los resultados.

En la tabla 5 se brinda información sobre las características de las 2 imágenes satelitales de enero 2016 y enero de 2020. Por otro lado, también se adquirió una imagen de julio del 2018 que, aunque cumplió con las características de temporalidad, en una pequeña parte de la zona de estudio presentó nubes de tamaño reducido y que para el objetivo de este estudio funcionó como evidencia de que la nubosidad afecta los resultados de anomalías térmicas esperados.

Tabla 5. propiedades de las imágenes satelitales adquiridas para la investigación.

Identificador	Fecha de adquisición	Hora de adquisición (local)	Día/noche	Path/row
"LC80090562016014LGN02"	2016/01/14	15:18	día	9/56
"LC80090562020009LGN00"	2020/01/09	15:18	día	9/56

5.3.3 Cálculos ráster y creación de mapas LST

Definidos los parámetros de selección para las imágenes satelitales térmicas, se procedió a su procesamiento. El proceso para generar un mapa de temperaturas superficial del suelo (LST) es extenso, y es propenso a generar errores. La herramienta también puede ser desarrollada en cualquier software que soporte el cálculo de píxeles de una imagen dada (Jovanovska, 2016), siguiendo paso a paso una serie de operaciones matemáticas aplicadas a las imágenes con variables contenidas en el Metadato (MTL) de cada imagen se obtuvo un ráster que equivale a un mapa LST como se explica a continuación:

Para el procesamiento se utilizó el software ArcGIS 10 y la herramienta “Ráster Calculator” contenida dentro de este. Aplicando los siguientes procedimientos y cálculos dentro de la herramienta según lo propuesto por (Jovanovska, 2016):

1. Se tomaron las siguientes bandas de Landsat 8: la banda 10 como banda térmica y las bandas 4 y 5 para calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NVDI) necesario para realizar las operaciones.
2. La radiación espectral TOA por sus siglas en ingles “Top Of Atmospheric” se estimó utilizando la ecuación:

$$TOA = M_L * Q_{cal} + A_L$$

Donde M_L es el factor de reescalamiento multiplicativo de la banda específica, en este caso la banda 10, Q_{cal} se refiere a la banda térmica 10 y A_L corresponde al factor de reescalamiento aditivo de la banda 10. Como se dijo anteriormente, este tipo de datos hacen parte de valores numéricos que están contenidos dentro del archivo metadato cada imagen satelital, al igual que las variables nombradas más adelante.

3. Se generó la Temperatura de brillo (BT Brightness Temperature)

$$Bt = (K_2 / (\ln(K_1 / TOA) + 1)) - 273.15$$

Donde K_1 y K_2 son constantes de conversión para la banda 10, TOA fue calculado antes y con el fin de obtener valores en unidades Celsius, la temperatura se ajusta al cero absoluto.

4. Se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI Normal Difference Vegetation Index)

$$NDVI = (Banda\ 5 - Banda\ 4) / (Banda\ 5 + Banda\ 4)$$

5. El siguiente paso fue calcular la proporción de vegetación o P_v

$$P_v = \sqrt{((NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}))}$$

Los valores de NDVI máx. y min son tomados directamente de las imágenes en el rango de valores de la simbología, o pueden ser visualizados en las propiedades del ráster.

6. Se calcula la Emisividad ϵ

$$\epsilon = 0.004 * P_v + 0.986$$

Donde los valores son predeterminados en la metodología de Avdan et al. (2016) y el P_v es el valor calculado en el paso anterior.

7. Por último, se calculó la temperatura superficial de la tierra (LST Land Surface Temperature)

$$LST = (BT / (1 + (0.00115 * BT / 1.4388) * \ln(\epsilon)))$$

Donde los valores numéricos son predeterminados en Avdan et al. (2016) y las variables son calculadas anteriormente.

Un aporte importante para este tipo de estudios fue la automatización del proceso matemático con la herramienta “Model Builder” de ArcGIS con un código automático en Python, como se muestra en el siguiente flujograma (Fig.6) pues permitirá generar los mapas LST de forma automática en cualquier zona.

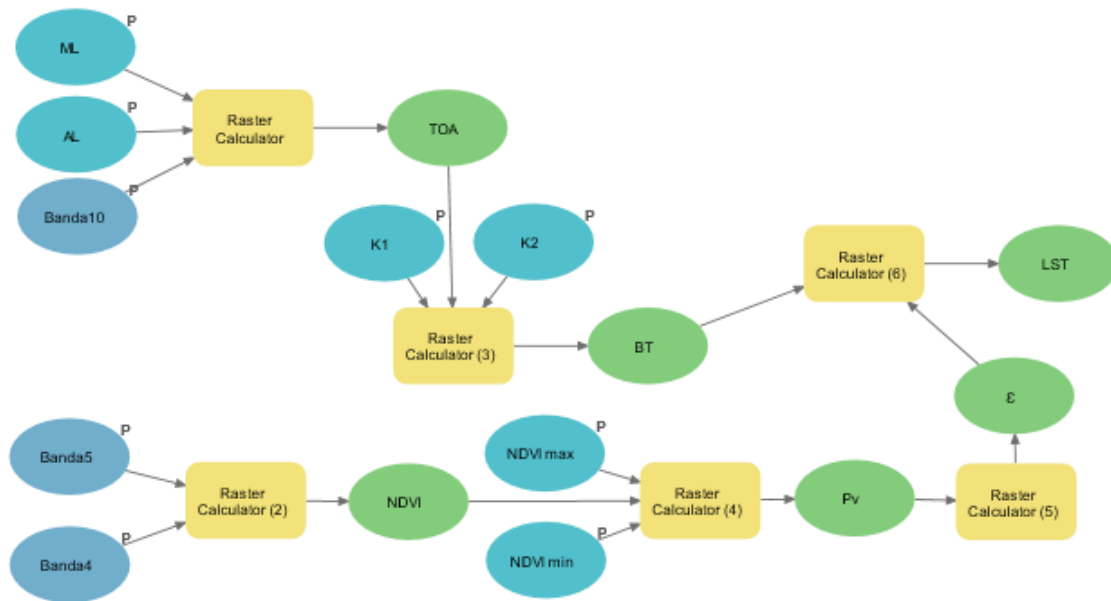


Fig. 6. Flujograma, para código de automatización de código en Python modelado en la herramienta Model Builder.

Cabe mencionar que los resultados que se obtuvieron en cada una de las operaciones no se muestran como resultados numéricos, en cambio, su producto es una imagen ráster final.

Una vez obtenidas las temperaturas de la superficie terrestre (LST) se clasificaron en 15 rangos de temperaturas de igual tamaño, posteriormente se le asignó un valor de importancia más significativo a las temperaturas menores a 17°C que son las temperaturas que se cree que corresponden a zonas con aguas subterráneas emergentes o mejor dicho zonas de descarga.

5.4 Delimitación de zonas de descarga

Para este caso de estudio se tuvieron en cuenta los modelos de terreno como: mapa de curvatura, mapa de pendientes, mapa de lineamientos y modelos LST y se procedió a asignar importancias para los rangos de los modelos de terreno y pesos para cada uno de los modelos de terreno:

1. Inicialmente se **asignaron importancias relativas** de 1 a 5 (siendo 5 el valor de más importancia y 1 el de menor importancia) a cada uno de los rangos o categorías dentro de los modelos de pendientes y curvaturas, como también para las variables de lineamientos y temperatura. Como muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Valores de importancia para los factores. En el cuadro se presentan los parámetros utilizados, su división por clases e importancia.

lineamientos	Descripción	importancia
1	Cerca (0m-15m)	5.00
2	Moderadamente cerca (15m-30m)	3.00
3	Distante (30m-45m)	1.00
Pendientes	clase	importancia
1	Plano	5.00
2	Ligeramente Inclinado	1.00
3	Moderadamente Inclinado	1.00
4	Fuertemente Inclinado	3.00
5	Ligeramente Escarpado	5.00
6	Moderadamente Escarpado	5.00
curvatura	clase	importancia
1	Cóncavo	5.00
2	Convexo	1.00
3	Plano	3.00
temperatura	Descripción	importancia
1	Mínima (<17 °C)	5.00
2	Máxima (>17 °C)	1.00

2. Después de haber asignado las importancias relativas en el numeral anterior se procedió **a asignar un peso** que también es relativo a cada variable (temperatura y lineamientos) o modelo de terreno (curvatura y pendientes). Se construyó una matriz que involucraba 9 diferentes combinaciones de porcentajes en peso para cada variable o modelo de terreno y de los cuales se arrojó 9 posibles resultados de mapas de zonas de descarga. Como se muestra en la sección de anexos, donde se encuentra toda la matriz desarrollada.
3. Finalmente, con la herramienta "Raster Calculator" de ArcGIS 10 se multiplicó cada variable (temperatura y lineamientos) o modelo (curvatura y

pendientes) por el peso asignado y se suman entre ellas como se muestra en la ecuación {1} y este proceso se repitió 9 veces debido a que, como se explicó en el punto anterior se desarrollaron 9 diferentes combinaciones de peso.

$$\text{Ecuación [1]: } (Temperatura * \%Peso) + (\text{Lineamientos} * \%Peso) + (\text{Pendientes} * \%peso) + (\text{Curvatura} * \%Peso)$$

5.4.1 Análisis de importancia por rangos y categorías de cada modelo.

Como se mencionó antes, para llevar a cabo el álgebra de mapas es necesario definir la importancia que tiene cada una de las categorías y rangos propios de cada modelo de terreno de la siguiente manera (ver tabla 6):

- Pendientes: Para el modelo de terreno de pendientes se tienen seis categorías, donde; *plano* tiene una importancia de **5** debido a que son consideradas zonas de acumulación de flujos, donde bien puede haber recarga o descarga en forma de humedales, *ligeramente inclinado* y *moderadamente inclinado* tienen una importancia de **1** debido a que no son lo suficientemente planas para acumular flujos, *fuertemente inclinado* se le asignó una importancia de **3** debido a que no cuenta con la inclinación suficiente para cortar la topografía y que haya algún escape de flujos subterráneos; finalmente, los rangos de *ligeramente escarpado* y *moderadamente escarpado* se les asignó una importancia **5** debido a que en estas inclinaciones se presenta un corte entre los flujos subterráneos con la topografía.
- Lineamientos: partiendo de la premisa de que entre más cerca esté una masa de roca a un lineamiento, este va a tener más fracturas asociadas a dicha discontinuidad lo que provoca una porosidad secundaria que facilita la circulación de aguas subterráneas, se definieron tres rangos de distancia con respecto a los lineamientos que corresponden a; (1) *(30m-45m)* le corresponde una importancia de **1** debido a que no hay fracturas asociadas a la discontinuidad por lo tanto es improbable que haya una porosidad secundaria que facilite la transmisividad del agua, (2) *(15m-30m)* se definió con importancia de **3**, debido a que esta se encuentra en un punto medio entre lo que se denominó cercano a la zona fracturada y lejano a la misma y (3) *(0m-15m)* se le asignó una importancia de **5** que como se había mencionado en la metodología, corresponde al valor de mayor importancia debido a su cercanía con la discontinuidad y se asocia con una zona donde hay más concentración de fracturas y porosidad secundaria.
- Curvatura: para el modelo de curvaturas se definieron tres categorías, a la categoría *Convexa* se le asignó un valor de importancia **1** debido a que estas áreas corresponden a zonas de transición de flujos superficiales y subsuperficiales, la categoría de *Plano* y *Cóncavo* se les asigna valores de **3** y **5** respectivamente, debido a que estas zonas si se pueden considerar áreas

de acumulación de flujos donde pueden interactuar los flujos subterráneo con la superficie y generar ocurrencia de zonas de descarga.

- Temperaturas: según las estaciones de monitoreo múltiple instaladas por CORANTIOQUIA en la cuenca del río Piedras para el plan de ordenamiento del recurso hídrico del río Piedras en el año 2017, donde las mínimas temperaturas registradas de las aguas subsuperficiales en la cuenca fueron de 15.8°C para la parte alta de la cuenca y de 17,3°C para la parte más baja de la cuenca; con base a lo anterior se definió que las temperaturas de la superficie que estuviesen por debajo de los 17°C, se le asignó una importancia de 5, pues como bien se ha mencionado, las anomalías térmicas de temperaturas bajas corresponden a aguas subterráneas y consecuentemente las temperaturas mayores a 17°C les corresponde una importancia de 1, pues para en este caso de estudio no corresponderían a anomalías térmicas asociadas a aguas subterráneas.

5.4.2 Selección del mejor modelo

Después de realizados las diferentes interacciones o experimentos aleatorios se eligió el modelo que mejor se ajustaba a las siguientes características:

1. Que marcara las zonas de descarga donde se sabía que había pendientes escarpadas. Además, de lugares con pendientes planas.
2. Lugares donde se conocía que la curvatura del terreno era cóncava pues allí se facilita la acumulación de flujos subterráneos y superficiales.
3. El modelo debía marcar las zonas de descarga en los lugares más aledaños a los lineamientos debido a que allí como se ha mencionado es donde los flujos subterráneos tienden a emerger.
4. Debía marcar las zonas de descarga en lugares donde las temperaturas fueran más frías, pues como se ha mencionado las aguas subterráneas tienen una temperatura menor a las aguas superficiales y a la misma superficie.
5. El modelo no puede marcar grandes extensiones que correspondan a zonas de descarga debido a que estas suelen corresponder a lugares puntuales.
6. El modelo elegido fue el que tuviese más peso en los modelos geomorfológicos como pendientes, curvaturas con respecto a la temperatura, debido a que la variable de temperatura puede generar incertidumbre en este caso de estudio en específico, debido a lo explicado sobre los pocos contrastes de temperatura en el trópico.
7. Por último, este modelo elegido cuenta con un rango de valores entre 1 y 5, donde los valores mayores significan que hay más posibilidades de que el área sea una zona de descarga de aguas subterráneas, por tanto, se lleva a cabo la depuración por medio de un condicional, donde los valores mayores a 4 serán los exportados para generar una capa final con los polígonos definitivos.

5.5 Análisis de los flujos

Obtenidas las zonas de descarga y las zonas de recarga del trabajo de maestría (Villada A., 2021), además de los lineamientos y el mapa de aspectos se llega a representar las direcciones de los flujos subterráneos y superficiales en la cuenca de manera conceptual.

5.6 Validación de la información

Después de obtener los resultados producto de todo el procesamiento explicado anteriormente, se comprueba la validez de las zonas de descarga detectadas bajo la premisa de que los drenajes de primer orden que se encuentran en la cartografía básica en escala 1:10000 para drenajes sencillos otorgada por el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), son nacimientos de agua que por definición son zonas de descarga de aguas subterráneas. De esta forma se le asigna un área aleatoria de influencia de 100 metros alrededor de cada uno de los nacimientos para evaluar cuantos de los polígonos identificados como zonas de descarga coinciden o se encuentran dentro de esta área de influencia.

5.7 Modelo 3D

Para la modelación fueron utilizados los datos trabajados durante la investigación como el MED, drenajes, zonas potenciales de recarga adquiridos del proyecto de maestría y, por último, las zonas de descarga determinadas por esta investigación. El modelo se presenta en los resultados para su análisis final. Este fue modelado en el software AutoCAD Civil 3D, El modelo 3D en Revit LT™, y la edición de la imagen en Adobe Photoshop®.

6 RESULTADOS

Para facilitar los análisis hechos dentro del área de estudio, se hizo una división de la cuenca entre *zona alta*, *zona media* y *zona baja* (ver figura 5), debido a que cada una de estas zonas presenta comportamientos y características distintas. Especialmente con respecto a las temperaturas del suelo y de las aguas superficiales, pues como es sabido en las montañas, la temperatura varía dependiendo de la altura sobre el nivel el mar.

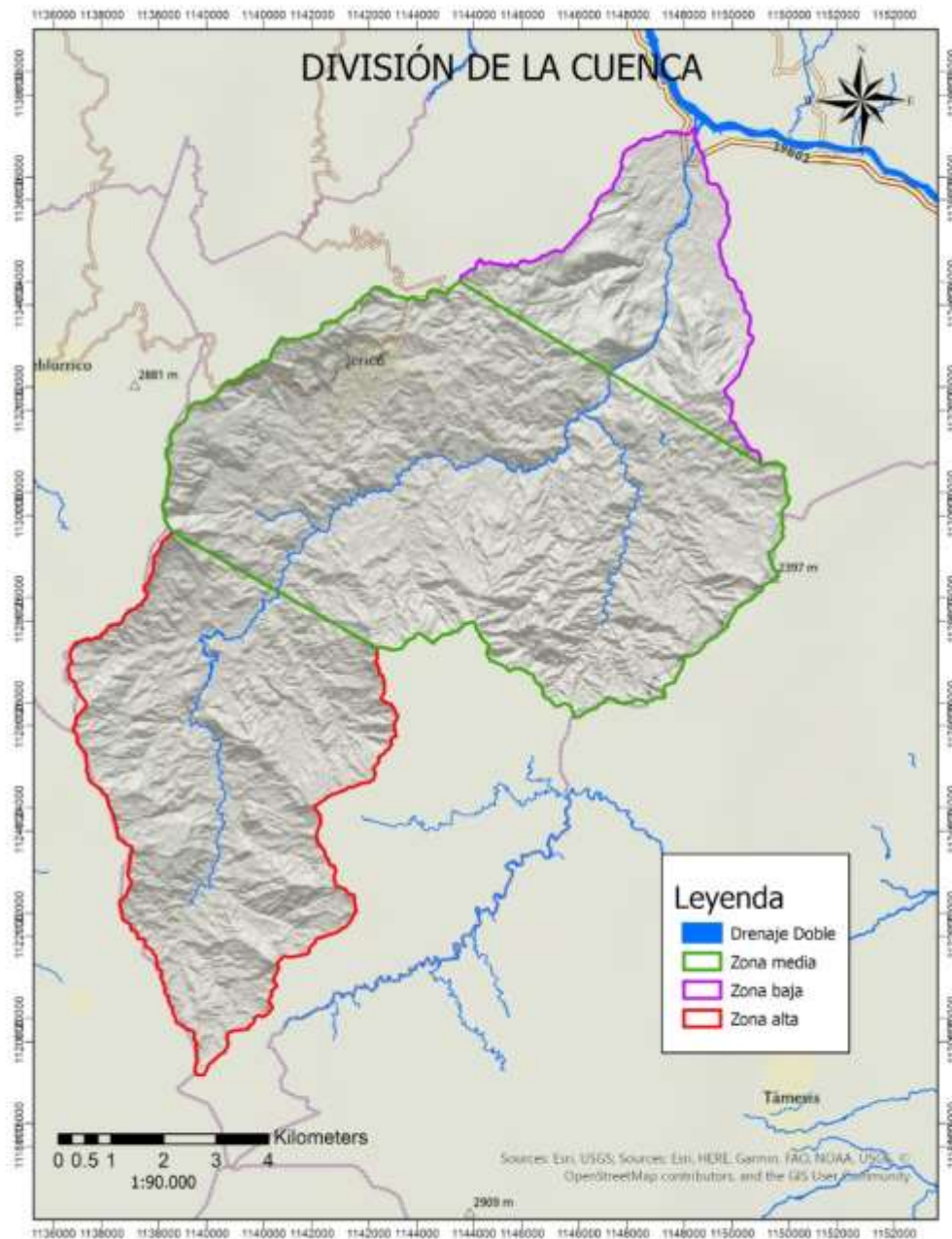


Fig. 7. Mapa de la división de la cuenca del río Piedras. Creación propia.

Según la división hecha para este estudio la parte baja de la cuenca posee un área de 15,87 km² va desde los 600 msnm hasta los 1600 msnm, la parte media tiene un área de 61,08 km² va desde los 1600 msnm hasta los 1900 msnm y, por último, está la parte alta de la cuenca con un área de 36,85 km² que comprende desde los 1900 hasta los 2400 msnm.

6.1 Mapa de Pendientes

Los valores de pendientes expresados en porcentaje se clasificaron en siete categorías de acuerdo a la Unión Temporal Estudios Ambientales y Planificación Territorial del río Guarinó, 2015 que consta de: Plano (0%-3%), ligeramente inclinado (3%-7%), moderadamente inclinado (7%-12%), fuertemente inclinado (12%-25%), ligeramente escarpado (25%-50%), moderadamente escarpado (50%-75%) y fuertemente escarpado (>75%); sin embargo, la zona no cuenta con zonas fuertemente escarpadas, por lo que se tuvieron en cuenta las primeras seis categorías (Fig. 6). Finalmente, como se muestra en la Fig. 7 están las áreas acumuladas para cada una de las categorías de rangos de pendiente.

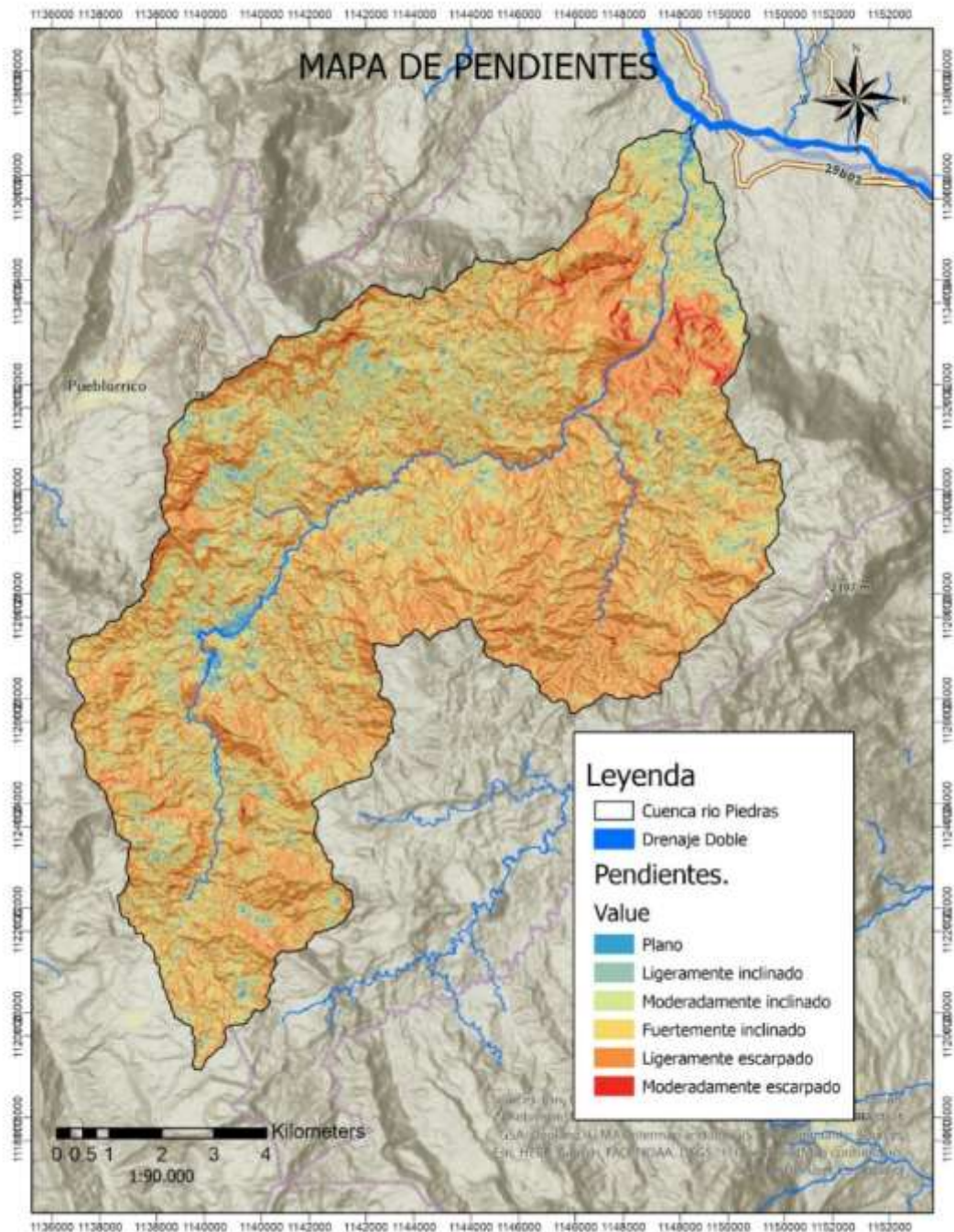


Fig. 8. Mapa de pendientes que indica la inclinación del terreno en porcentaje. Creación propia.

A continuación, se presenta un histograma (Fig. 7) con las categorías de pendientes ilustradas en el mapa que muestran la frecuencia acumulada por cada una de las categorías con respecto al porcentaje de área total de la cuenca del río Piedras.

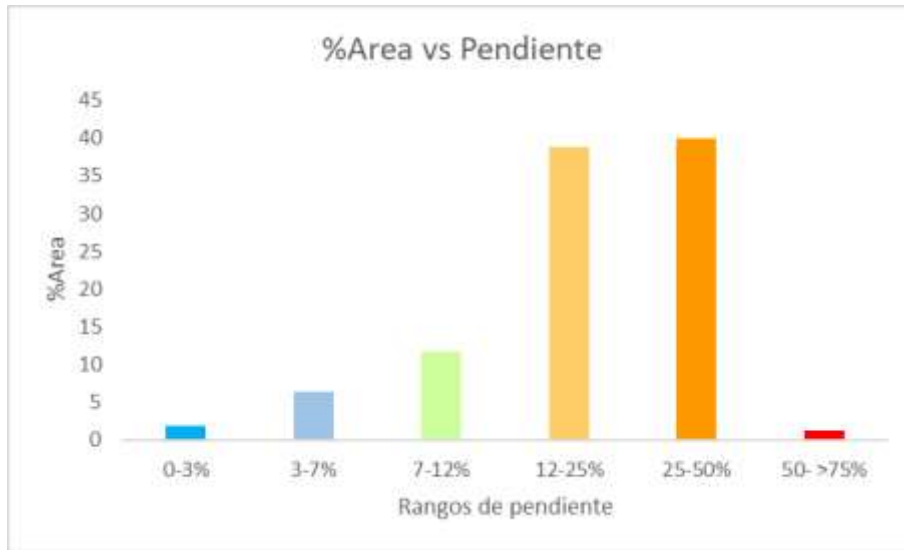


Fig. 9. Histograma con porcentaje de área por cada rango de pendiente sobre el área total de la cuenca del río Piedras. Creación propia.

El interés de este proyecto es el de identificar las zonas de descarga de aguas subterráneas dentro de la cuenca del río Piedras, las pendientes son una herramienta muy útil para su identificación, debido a que en las zonas escarpadas entre un 25% hasta 75% de inclinación es probable encontrar manantiales que corresponden a zonas de descarga puntuales que deben su origen a cortes topográficos en la superficie freática o también como consecuencia de cambios litológicos (Alfaro, P et al, 2006); Como dato específico cabe destacar que las pendientes del 50% al 75% representan un área de **47.01 km²**. Finalmente, la mayor concentración de zonas escarpadas con valores de pendiente de 25% a 75% se encuentra en la parte baja de la cuenca cerca a la desembocadura del río Cauca.

Con el fin de conocer la distribución de las pendientes escarpadas en la zona de estudio, se calculó por medio de ArcGIS 10, las áreas de pendientes mayores al 50% para cada zona alta, media y baja de la cuenca del río Piedras definidas anteriormente (Fig. 5).

Tabla 7 . Áreas y porcentajes de pendientes escarpadas en 3 diferentes zonas de la cuenca del río Piedras.

Zona de la cuenca del río Piedras	Cota en msnm	Área de la zona de la cuenca (km ²)	Área (km ²) de pendientes (>50%)
Alta	2400-1900	36.85	14.01
Media	1900-1600	61.08	25.03
Baja	1600-600	15.87	7.96

Otra observación que cabe resaltar es la relación de las pendientes con la geología; un ejemplo de dicha relación es que los cuerpos hipoabisales se asocian a pendientes escarpadas (>25%), mientras que en los depósitos aluviales las pendientes son menores (<25%) clasificándose como planas, moderadamente inclinadas y fuertemente inclinadas.

Sabiendo que la mayoría de la cuenca está cubierta por la Formación Combia, descrita como depósitos volcánicos y sedimentarios sobre las vertientes oriental y occidental del río Cauca, según Grosse 1926. Esto puede ocasionar que las pendientes se atenúen en las partes donde esta formación aflora, principalmente en la parte media de la cuenca presentándose pendientes planas hasta moderadamente inclinadas.

6.2 Mapa de Aspectos u orientación de las laderas

Para describir la orientación de las laderas en el mapa de aspectos se asignaron nueve categorías (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW, PLANO) y se calculó el porcentaje (%) del área por cada una de las categorías de dirección de pendiente con respecto al área total de la cuenca del río Piedras (Fig. 9). El mapa de aspectos es útil, pues brinda una idea de cómo es la dinámica de la dirección de los flujos superficiales y subsuperficiales que a su vez ayudan a entender las dinámicas de flujos más profundos. Se pudo llegar a esta premisa ya que este caso de estudio se asumió que el río Piedras hidrogeológicamente está ubicado sobre un acuífero libre, debido a las características geológicas como la composición de un macizo rocoso de origen vulcano-sedimentario, como es la Formación Combia. En la Fig. 8 se puede apreciar de forma gráfica las direcciones de las laderas para la zona de la cuenca del río Piedras.

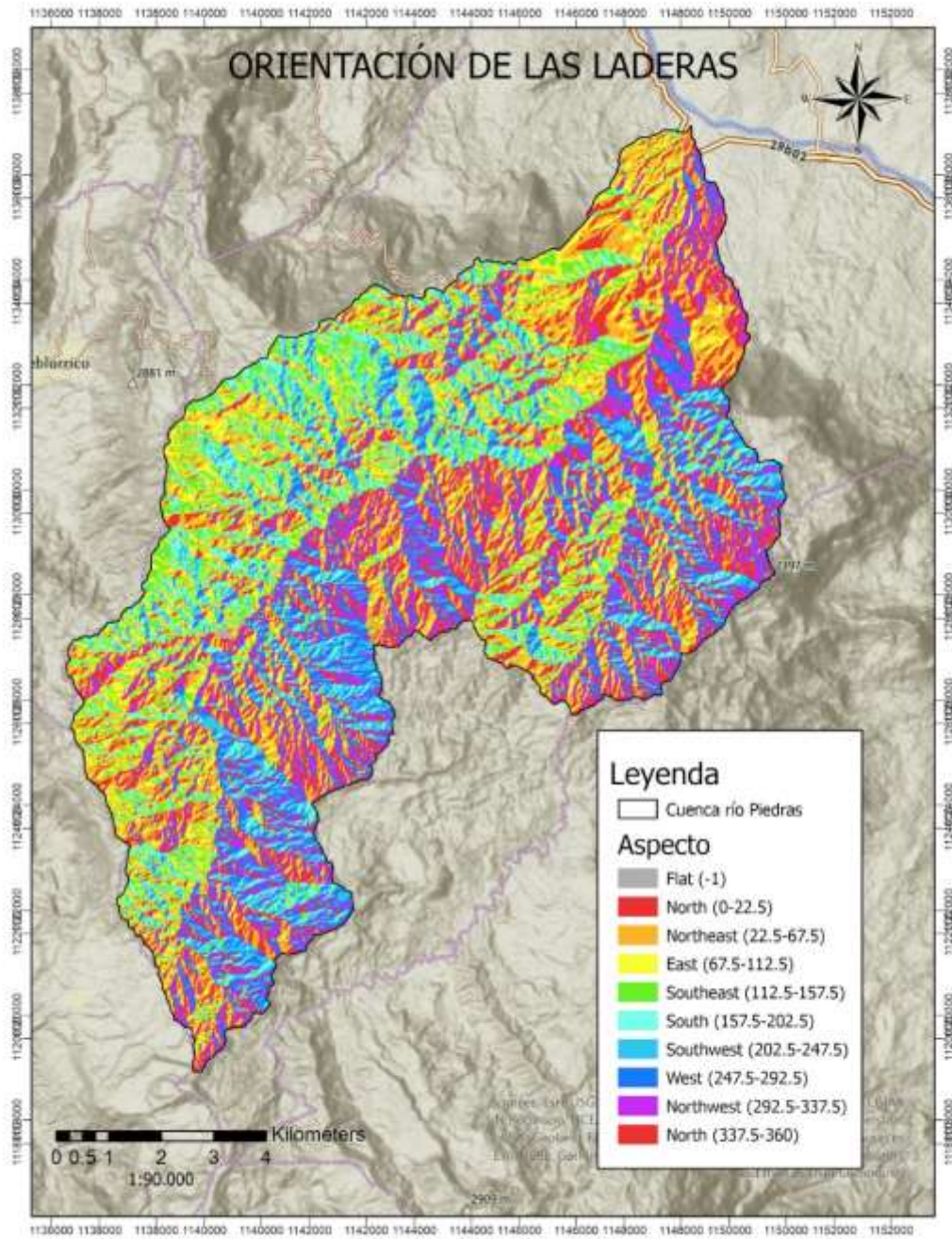


Fig. 10. Mapa de orientación de las laderas para la cuenca del río Piedras. Creación propia.

El 32% de las laderas tiene una orientación norte y noreste, hay una minoría de laderas que presentan orientaciones hacia el sur y suroeste como se puede ver en el diagrama (Fig. 9) donde solo el 9% de las laderas tiene una orientación sur, 9% orientación suroeste y 11% sureste. El resto de los datos representa el 49 % y tiene orientaciones noreste, este y oeste.

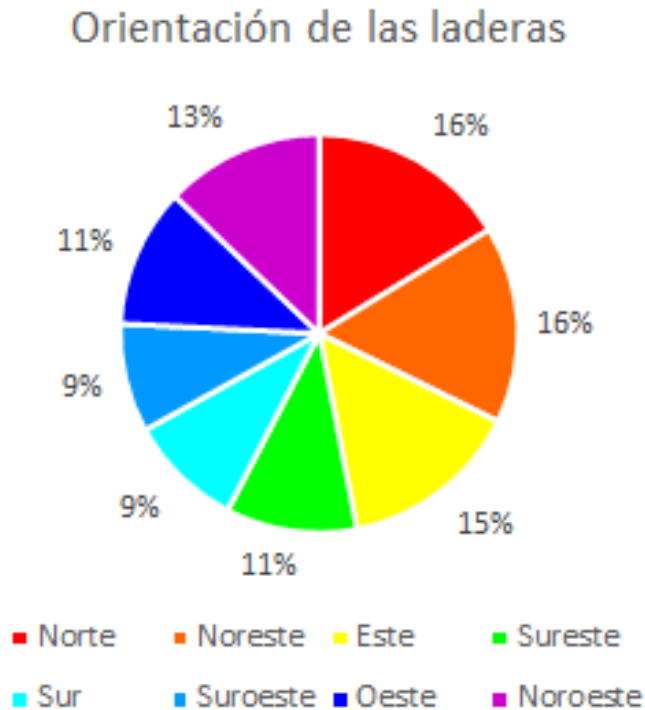


Fig. 11. Porcentaje de categorías del área total la cuenca según orientación de las laderas. Creación propia.

6.3 Mapa de Curvatura

El desarrollo de un mapa de curvaturas fue esencial para la elaboración de este trabajo debido a que, al identificar **zonas cóncavas**, estas pueden ser consideradas zonas de acumulación de aguas meteóricas como las aguas lluvias; como también se podría asociar a afloramientos de agua subterránea como las zonas de descarga en la parte baja de la cuenca. La identificación de las **zonas convexas** fue de utilidad como una posible manifestación superficial de la Formación Combia que está en gran parte del área de estudio y está compuesta en conglomerados de matriz tobácea, shales de color crema, areniscas tobáceas, tobas de cristal, tobas de cenizas, aglomerados y brechas volcánicas, siendo litologías que pueden llegar a tener una buena permeabilidad primaria y secundaria. Por lo anterior, se pensaría que los flujos superficiales y subsuperficiales presentan similares direcciones y debido a esto se pudo asociar a estas zonas convexas con una mayor aceleración de los flujos subsuperficiales que fueron determinantes en la elaboración del modelo conceptual de flujo.

Los valores que se obtuvieron para las diferentes categorías de curvatura fueron: convexo, cóncavo y plano como se muestran en la figura 10. Por otro lado, sus áreas en km² (Kilómetros cuadrados) se encuentran en la Tabla 8.

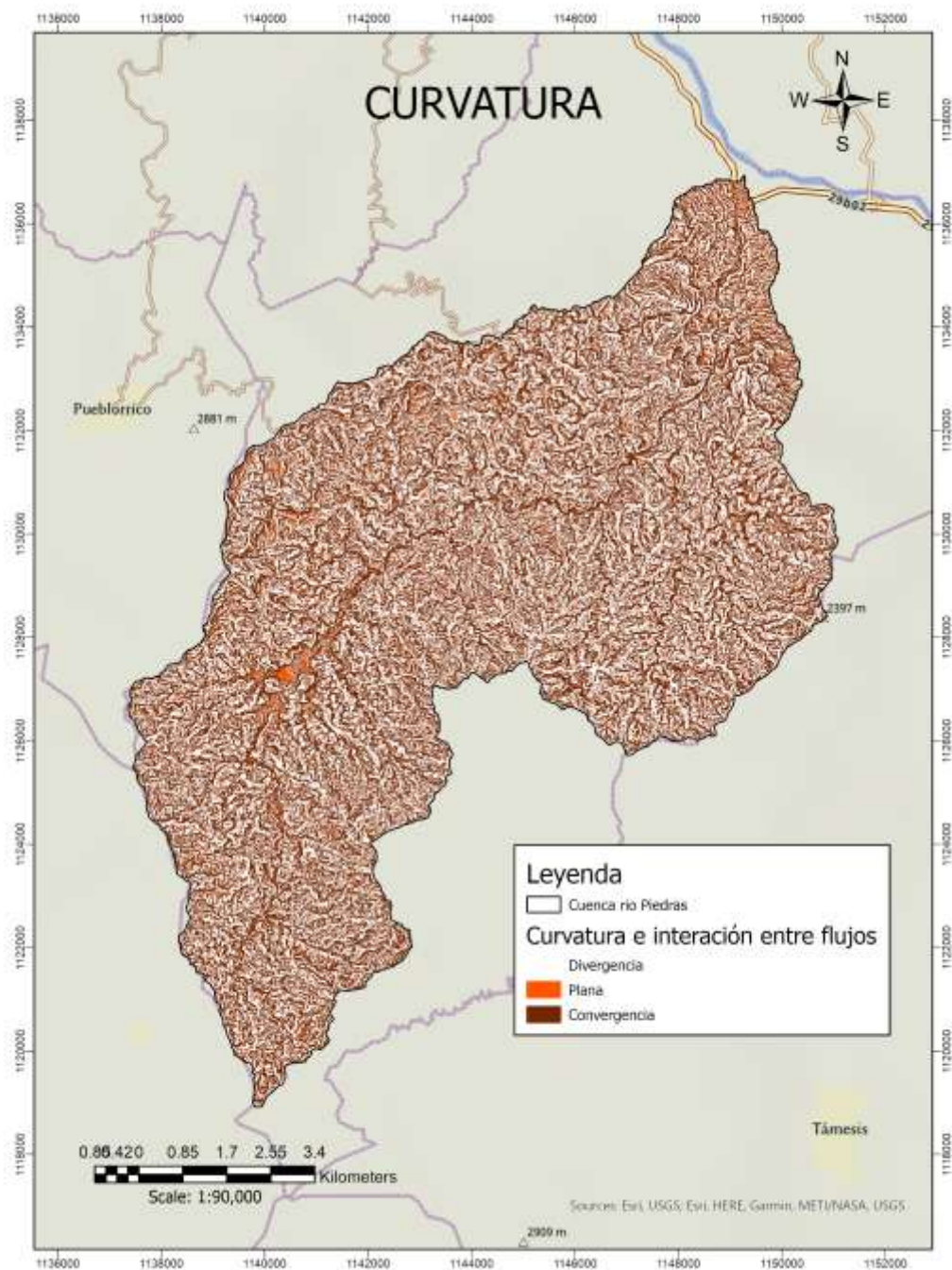


Fig. 12. Mapa de curvaturas que indica la forma de la pendiente para la cuenca del río Piedras. Creación propia.

Tabla 8. Áreas por categoría de curvaturas.

Descripción	Área km ²
A. Convergente	56.81
A. Divergente	54.38
A. Plano	2.62

6.4 Mapa de lineamientos

Los siguientes lineamientos corresponden a rasgos del terreno que tienen una continuidad lineal en el espacio, los presentes lineamientos son diferentes a las estructuras regionales definidas en la cartografía 1:100.000 del SGC, con la finalidad de lograr una escala más detallada de las estructuras locales que controlan los flujos tanto subterráneos como superficiales, se llegó al mapa de lineamientos como se muestra en la Fig. 11.

Para el objetivo primordial de proyecto de grado que es la identificación de zonas de descarga, el mapa de lineamientos tomado del trabajo de maestría (Villada A., 2021) ayudó a comprender la dirección de los flujos no sólo superficiales sino también subterráneos; pues como bien se sabe, los lineamientos asociados a una discontinuidad perteneciente a una falla, o cambios litológicos, o controles estructurales; pueden tener una continuidad en profundidad en un medio fracturado. La finalidad en la identificación de dichos lineamientos parte de la premisa de que estos facilitan la infiltración de agua meteórica en los acuíferos y que también pueden facilitar la salida de aguas subterráneas cuando los niveles freáticos se encuentran con la topografía y de esta forma, asociar estos lineamientos con zonas potenciales de recarga y zonas de descarga.

Cabe resaltar que las direcciones preferenciales de las laderas como se ve en el mapa de aspectos (Fig. 8) coinciden con las tendencias estructurales de los lineamientos analizados en los modelos de sombras (Fig. 11); donde la dirección de los lineamientos se encuentra dentro de los rangos NE-SW y a su vez, la dirección N-S es evidente en los lineamientos regionales obtenidos de la cartografía base del IGAC escala 1:10.000 (Fig. 2).

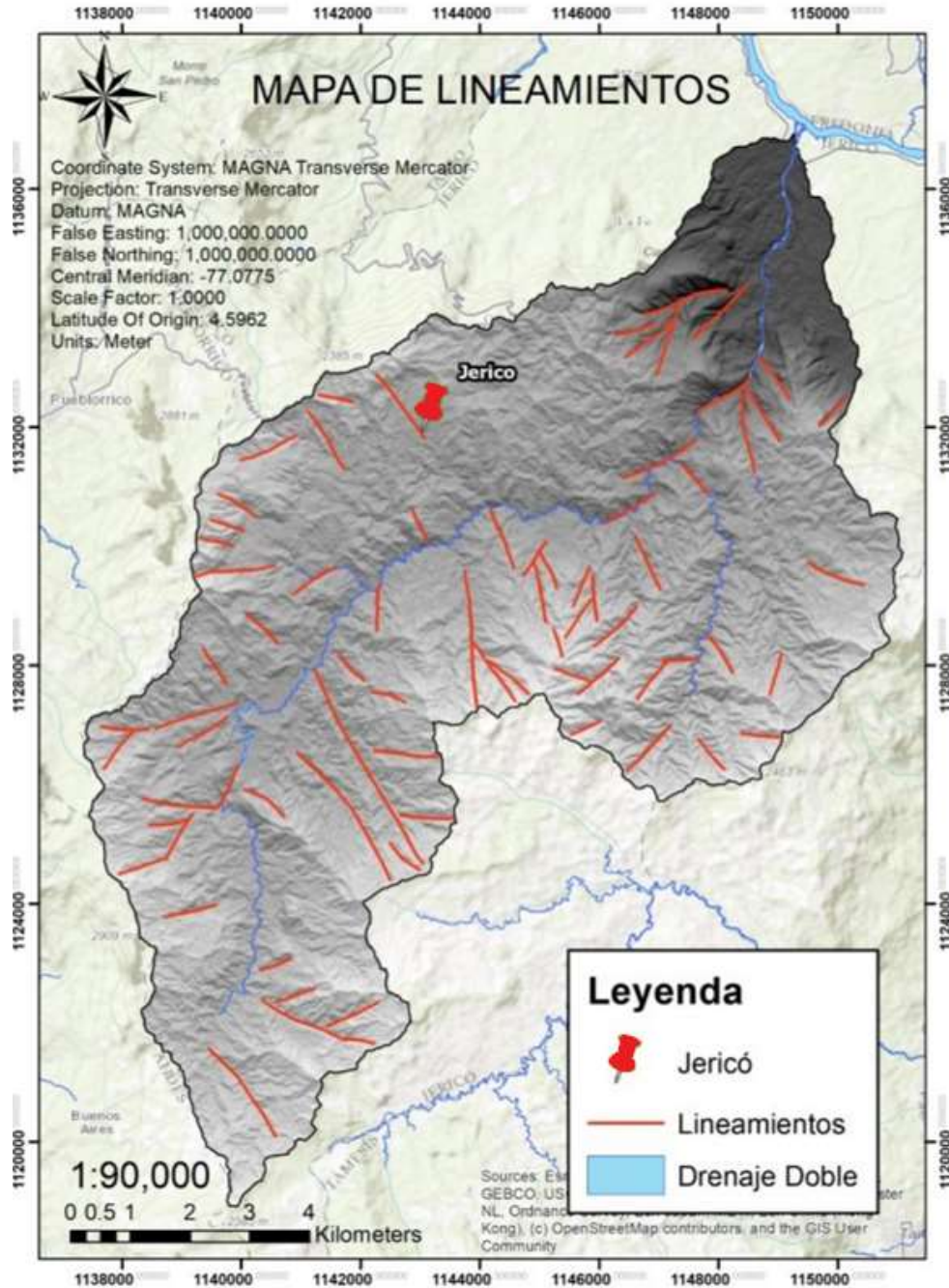


Fig. 13. Mapa de lineamientos a escala local para cuenca del río Piedras. Creación propia

Según el diagrama de rosas (Fig. 12) muchos de los lineamientos tienen tendencia en las direcciones preferenciales NEE y SE, ortogonales entre sí. Además, hay otras ortogonales NS. Estos datos se relacionan con las tendencias de las estructuras regionales pues para la zona de estudio y sus alrededores hay aproximadamente 3 estructuras locales o lineamientos que tienen una orientación NW-SE que no poseen un nombre en específico en la cartografía geológica que se extrajo del SGC. Sin embargo, dichas estructuras o lineamientos mencionados pueden estar

relacionados con el sistema regional de fallas Cauca Romeral. Retomando lo dicho sobre los lineamientos de orientación NW-SE, estos coinciden con los lineamientos hallados en este trabajo de grado con tendencia SE; por otro lado, hay aproximadamente otros 3 lineamientos o estructuras regionales que poseen una orientación SW-NE y coinciden con los lineamientos con tendencia NE encontrados en la cuenca del río piedras. Finalmente cabe destacar que las orientaciones de estos lineamientos son determinantes al momento de definir las direcciones preferenciales de flujo de las aguas superficiales, subsuperficiales y subterráneas; de esta forma, se dedujo que en la vertiente sur del río Piedras los flujos hídricos tienen una tendencia NW y los flujos en la vertiente norte del río Piedras tienen una tendencia SE.

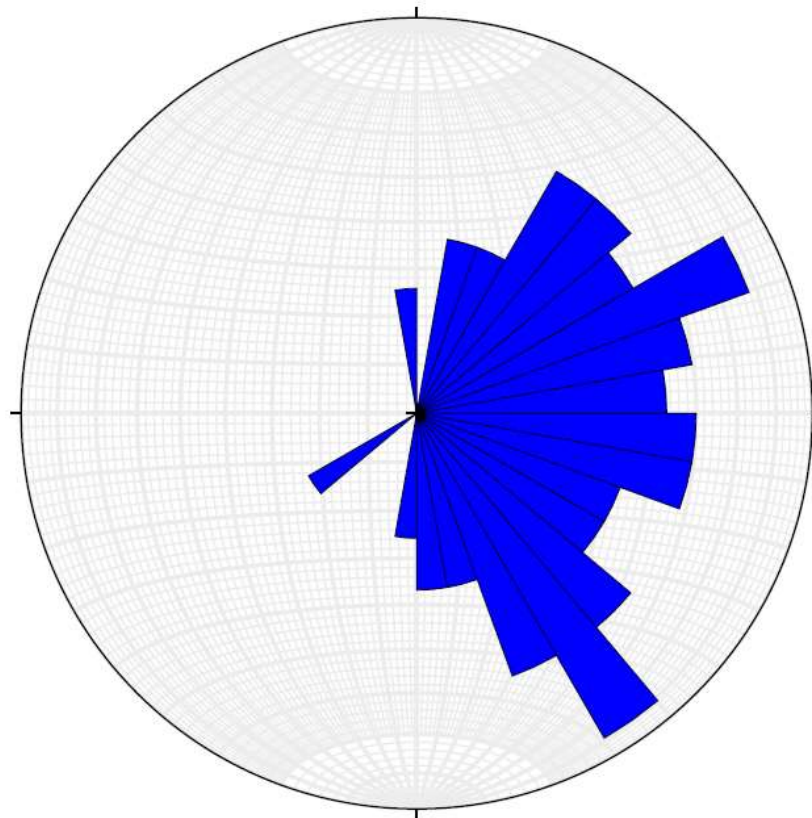


Fig. 14. Diagrama de rosas para los lineamientos a escala local. Creación propia con el software Visible Geology.

Se usaron trece categorías con rangos correspondientes a 300 metros de longitud cada uno (ver figura 13); y se obtuvieron los siguientes resultados: la categoría C (600-900) m es la mayoritaria con más del 45 % de los datos, la categoría D (900-1200) m es la que le sigue en orden de importancia con aproximadamente el 27% de los datos, en tercer lugar, está la categoría E (1200-1500) con el 10% de los datos, la categoría B (300-600) m es el 7% de los datos. Finalmente, las categorías A, F, G, H, J, M corresponde al 11 % de los datos restantes que son mayores a 1500 m exceptuando la categoría A que es menor a 300 m. La longitud

de los lineamientos puede ser determinante para determinar los flujos de aguas subterráneas debido a que en un medio fracturado el agua subterránea tiende a fluir por las fracturas más largas y continuas.

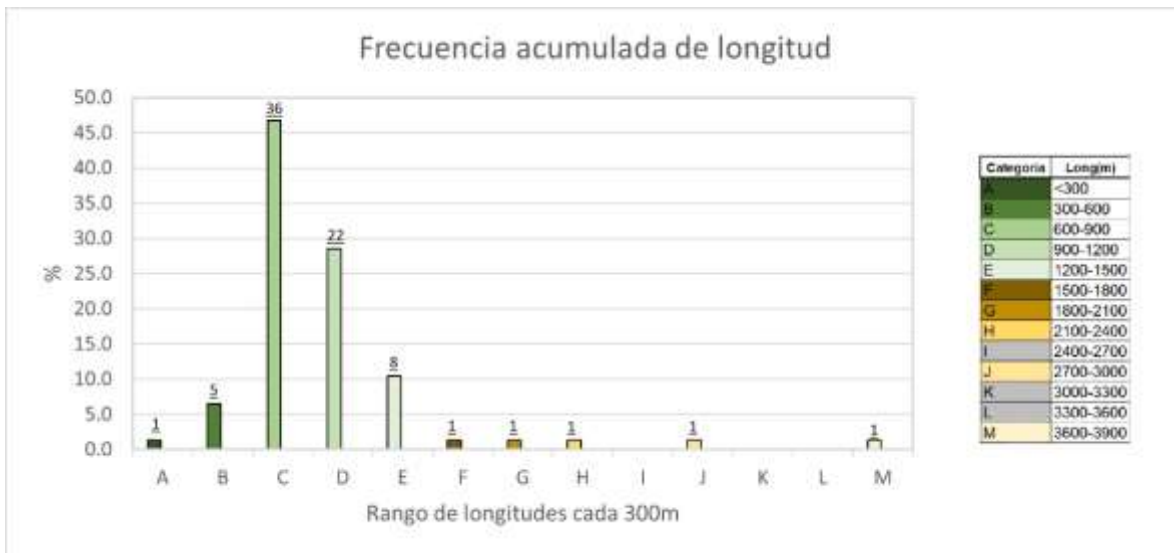


Fig. 15. Histograma de frecuencia acumulada para la longitud de los lineamientos por categorías.



Fig. 16. Histograma de frecuencia acumulada con orientación preferencial de lineamientos.

Para el total de los lineamientos identificados en la cuenca del río Piedras: el 41.6 % presenta una orientación NE-SW; el 40.3% exhibe una orientación NW-SE; por último, solo el 5.2% del total de los lineamientos presenta una tendencia N-S (Ver figura 13).

6.5 Mapas de la temperatura superficial del suelo (LST)

Con base en las imágenes satelitales térmicas y después de su debido procesamiento explicado en la metodología se obtuvo lo que se denominó mapas de “Land Surface Temperature” (LST), los cuales se les asignó 15 categorías de

temperatura con rango de temperatura uniforme. Cabe reiterar que estos mapas de LST se desarrollaron con las imágenes satelitales térmicas de los años 2016 y 2020 en el mes de enero para ambos años.

Para el mapa de temperaturas del año 2016 (Fig. 15), los rangos de temperatura van desde los 4°C hasta los 28°C; se puede observar las temperaturas más bajas en la parte alta de la cuenca asociadas a las divisorias, mientras que las temperaturas más altas se identifican especialmente al Norte correspondiente a la desembocadura del río Piedras en el río Cauca. Por otro lado, se evidencia temperaturas más bajas en las periferias de la cuenca y en zonas de concentración de lineamientos, en particular, en la parte media de la cuenca, sobre la vertiente sur del río Piedras es apreciable como coinciden múltiples lineamientos con las temperaturas bajas.

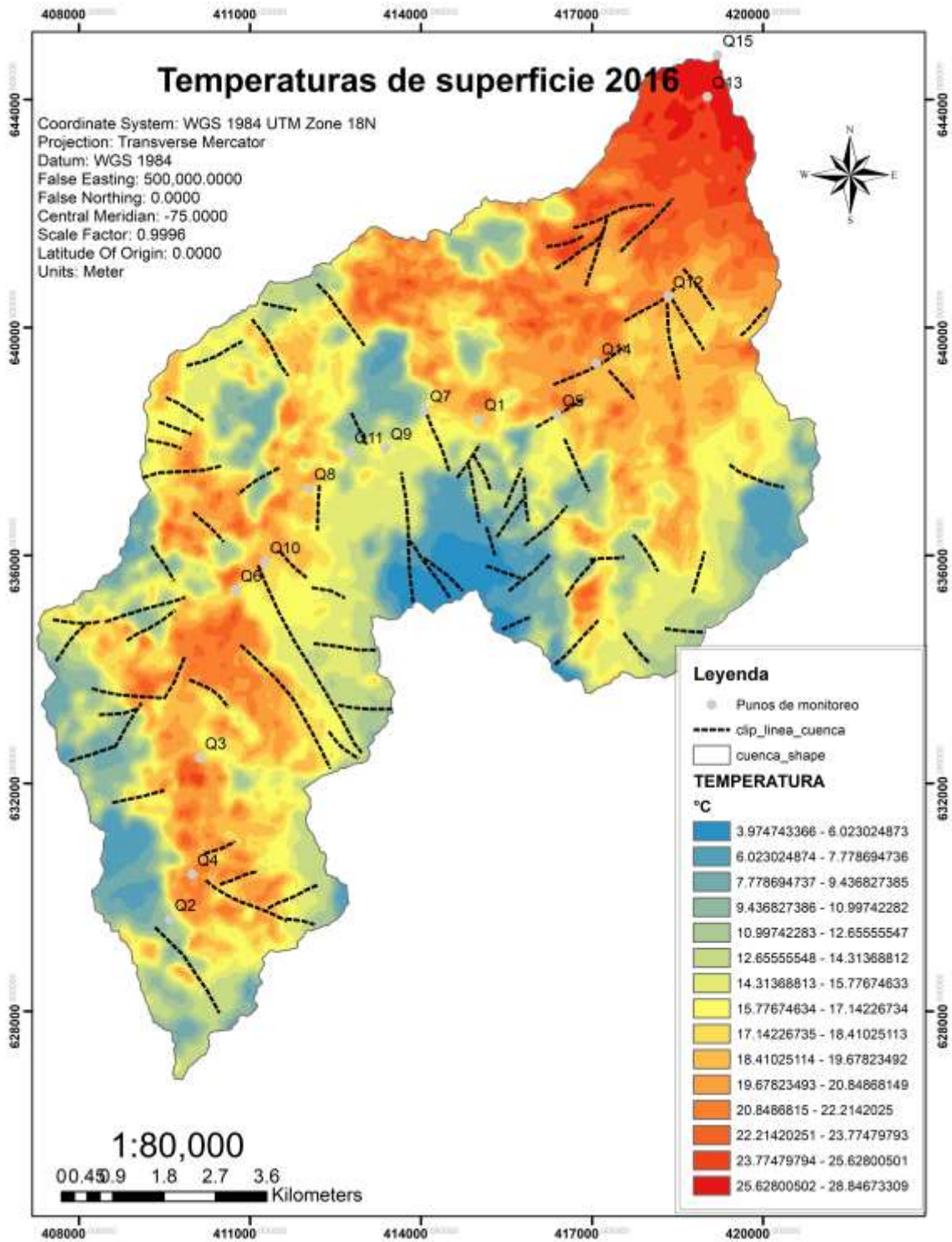


Fig. 17. Mapa de la temperatura superficial del suelo (LST) en grados centígrados (°C) para el año 2016.

En el mapa de temperaturas del 2016 parecen ser anómalas las temperaturas menores a 10°C, debido a que estas no son comunes en cuencas hídricas de esta naturaleza, se podría decir que estos valores son debido a zonas con nubosidad y zonas con bosque denso. Como también, podría deberse a que las imágenes satelitales térmicas (TIR) usadas para este caso de estudio no cuentan con un proceso denominado “corrección atmosférica” que es necesaria para eliminar errores que son producidos por la interacción del sensor del satélite con la atmósfera.

Con la finalidad de poder comparar los resultados anteriores se elaboró un mapa de temperaturas de la superficie para el año 2020 (Fig. 16) donde los rangos de temperatura obtenidos van desde los 15 °C hasta los 30°C. En este mapa también se hace evidente que las temperaturas más bajas se encuentran en las divisorias, como también, específicamente en los lugares donde hay concentración de lineamientos; como por ejemplo las zonas próximas al escarpe que está cercano a la desembocadura del río Piedras en el río Cauca. Esto es relevante pues ayuda a verificar que los lineamientos son lugares donde el agua subterránea puede fluir y, por lo tanto, muestra valores de temperatura menor.

En los dos modelos de temperatura superficial es evidente que las mayores temperaturas tienden a situarse en la superficie cercana al cauce del río Piedras, como también en zonas aledañas o zonas cercanas a la desembocadura del río Cauca. Por último, cabría mencionar que hay un comportamiento generalizado de aumento en el número de áreas con superficies de temperaturas más cálidas a medida que se desciende en la elevación de la cuenca. Es decir, que el descenso de la altura sobre el nivel del mar es directamente proporcional al aumento de la temperatura.

Finalmente, ambos mapas coinciden en que las mayores temperaturas se encuentran en la parte baja de la cuenca y al N de la parte media de la cuenca específicamente en la vertiente al N del río Piedras. Sin embargo, la temperatura demostrada en las imágenes del año 2016 resultan ser anómalas (Temperaturas más frías de lo normal) ya que para enero de este año el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) reportaba precipitaciones y actividades climatológicas relacionadas al fenómeno Niño, el cual se desarrolla en el Pacífico debido al decaimiento de los vientos Alisios y el aumento de la temperatura en la superficie del océano, estos factores generan climas cálidos, bajas precipitaciones y disminución de la humedad del suelo, es por esta razón que el equipo de trabajo decidió descartar dicha imagen térmica satelital con el fin de obtener resultados más cercanos a la realidad y se utilizó la imagen térmica 2020 para generar las zonas de descarga.

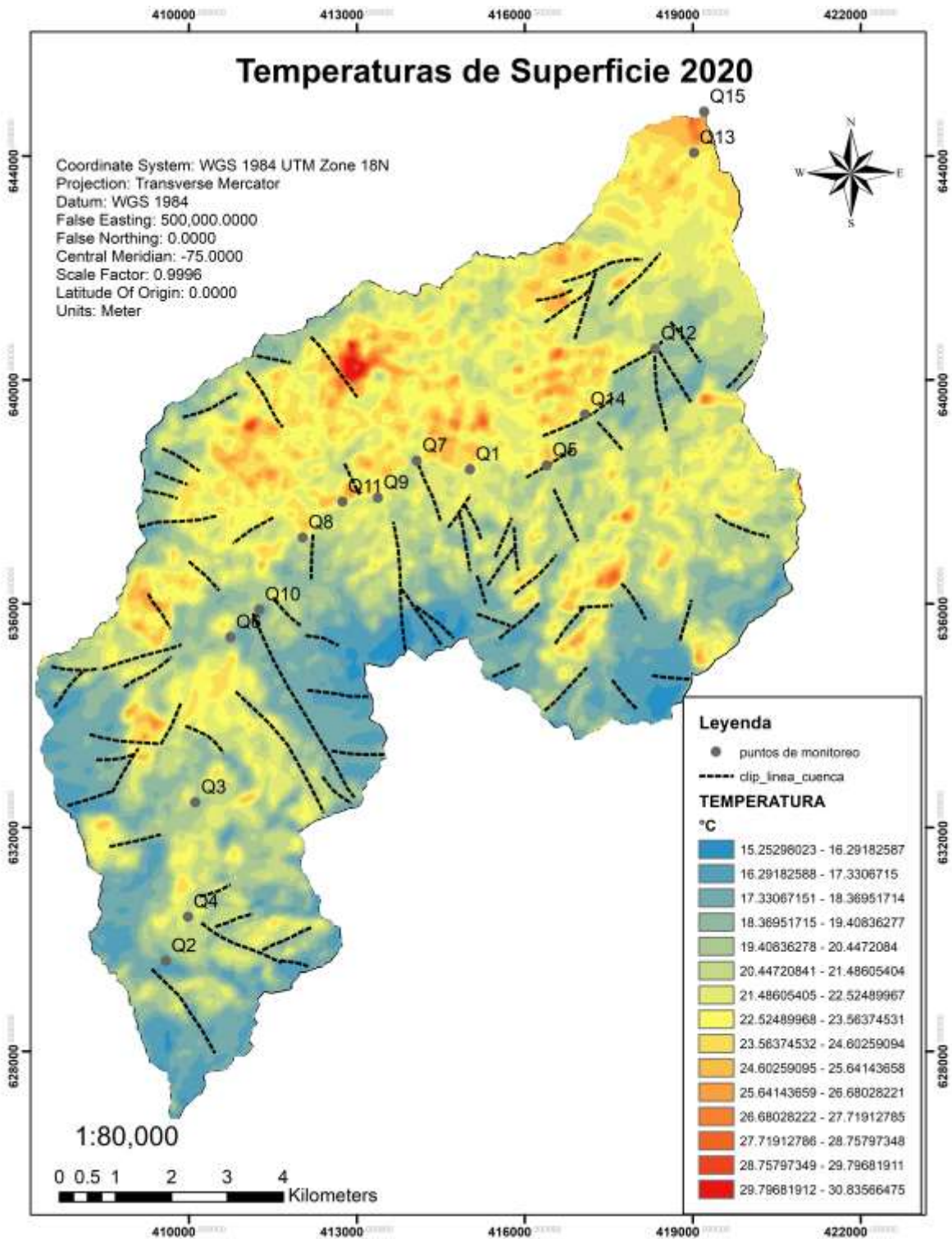


Fig. 18. Mapa de la temperatura superficial del suelo (LST) en grados centígrados (°C) para el año 2020.

Para la identificación de anomalías térmicas se tuvo en cuenta los contrastes de temperatura entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas, pues como bien se ha mencionado en el marco teórico, las aguas subterráneas suelen tener temperaturas mucho más bajas que las aguas superficiales cuando son épocas de verano en latitudes altas y la mayoría del tiempo en los trópicos. Sin embargo, se puede hacer la salvedad que las aguas termales son también aguas subterráneas que tiene temperaturas mayores a las aguas superficiales, pero este no será el caso en esta investigación. La temperatura menor de las aguas subterráneas se debe probablemente a que estas no han estado en contacto con la radiación solar y la temperatura ambiente de la superficie (Joseph J. Tamborski, 2015).

6.6 Mapa de zonas de descarga

Como se mencionó con anterioridad en la metodología, el proyecto busca generar las áreas correspondientes a zonas de descarga basado en Algebra de Mapas, que, operando sobre una o varias de estas capas, nos permite obtener información derivada, generalmente en forma de una nueva capa de datos resultante de dicha operación matemática simple. A continuación, se explica la manera en la que se le asignan unos valores de importancia a cada una de las categorías y rangos de datos dentro de cada modelo de terreno (pendientes, curvaturas, lineamientos y temperaturas), también se le asigna unos valores de importancia a cada modelo ráster antes de desarrollar el algebra de mapas en el Software ArcGIS 10.

6.6.1 Asignación de pesos y análisis estocástico

Es válido recordar que como se había mencionado en la metodología, el equipo de trabajo realizó un análisis estocástico (aleatorio) para la asignación definitiva de los pesos de cada variable. Para esto fueron generados nueve diferentes modelos donde se expresan variaciones de peso para los modelos y/o variables, los primeros ocho fueron descartados y esto se debe a que en algunos casos como por ejemplo los mapas 1, 3, 5 y 6 (ver Anexo 1) demostraban las zonas de descarga (de color rojo) como áreas muy puntuales relacionadas netamente a la presencia de lineamientos, esto se debe a la gran importancia aplicada a dicho parámetro. En otros casos como, por ejemplo 2, 4 y 8 mostraban áreas un poco más relacionadas al tipo de curvatura, sin embargo, se consideraban áreas muy grandes y vinculadas exclusivamente a las zonas más altas de la cuenca. Por último, la combinación número 7 se tomó como el resultado más equilibrado, en el que la pendiente y la curvatura jugaban un papel importante, esta relación arrojó áreas más coherentes como polígonos sobre las laderas y zonas bajas de la cuenca.

Teniendo en cuenta este resultado se generó un mapa *definitivo 7* (Ver Fig. 17) subrayado con color azul, donde **los lineamientos** en este caso tenían un valor de porcentaje en peso de 0.15, porque si bien deberían tener un peso significativo, no se puede demostrar que estas estructuras tengan una continuidad en profundidad que garantice que los flujos subterráneos fluyen a través de la ellas, debido a que en esta investigación no se desarrollaron salidas de campo o campañas geofísicas para validarlo.

La curvatura y las pendientes fueron calificadas con un valor porcentaje en peso mayor que el de los lineamientos de 0.5, ya que se considera que estas formas del

terreno pueden llegar a controlar los flujos subterráneos que interactúan con la superficie, un ejemplo de esto es que, en una forma cóncava o plana, los flujos tienden a acumularse. Por otro lado, para una pendiente escarpada estos flujos subterráneos como se ha mencionado anteriormente suelen permear a través de la roca. Por último, para **la temperatura superficial** fue asignado el valor de porcentaje en peso de 0.15, porque a pesar de ser una variable esencial en la investigación, se hace necesario resaltar que las imágenes satelitales térmicas usadas no corresponden a imágenes tomadas a un horario nocturno como sería lo ideal, en consecuencia, estas imágenes térmicas presentan muchas variaciones de temperatura en la superficie por el efecto de la radiación solar en climas tropicales.

6.6.3 Zonas de descarga

Finalmente, se elaboró el resultado final que son las zonas de descarga hídrica del o los acuíferos vinculados a la cuenca de estudio. En términos generales se obtuvo que la mayoría de ellas se encuentran en la parte media de la cuenca, junto con otras zonas de descarga que como se esperaba, aparecieran cercanas a la zona escarpada anterior a la desembocadura del río Cauca. En resumen, es válido destacar que la relación del lugar donde se encuentran las zonas potenciales de recarga (ZPR) y las zonas de descarga (ZD) generadas durante la investigación están distribuidas en una disposición diferente en el espacio, en consecuencia se podría inferir sobre los flujos locales de la cuenca en cuestión, debido a que las zonas donde el agua lluvia se infiltra y otras donde el agua subterránea se permea hacia la superficie se conectan por medio de líneas de flujo como se mostrará en la sección del modelo tridimensional (Fig. 18). También fueron inferidas las direcciones preferenciales de los flujos al interpretar el modelo de aspectos o dirección de las laderas y el modelo de lineamientos.

A continuación, se generó un mapa de zonas de descarga hídrica resultante del desarrollo del álgebra de mapas arrojando una serie de polígonos que suman 6.53 km² que corresponden al 5.73% del área total de la cuenca hídrica estudiada.

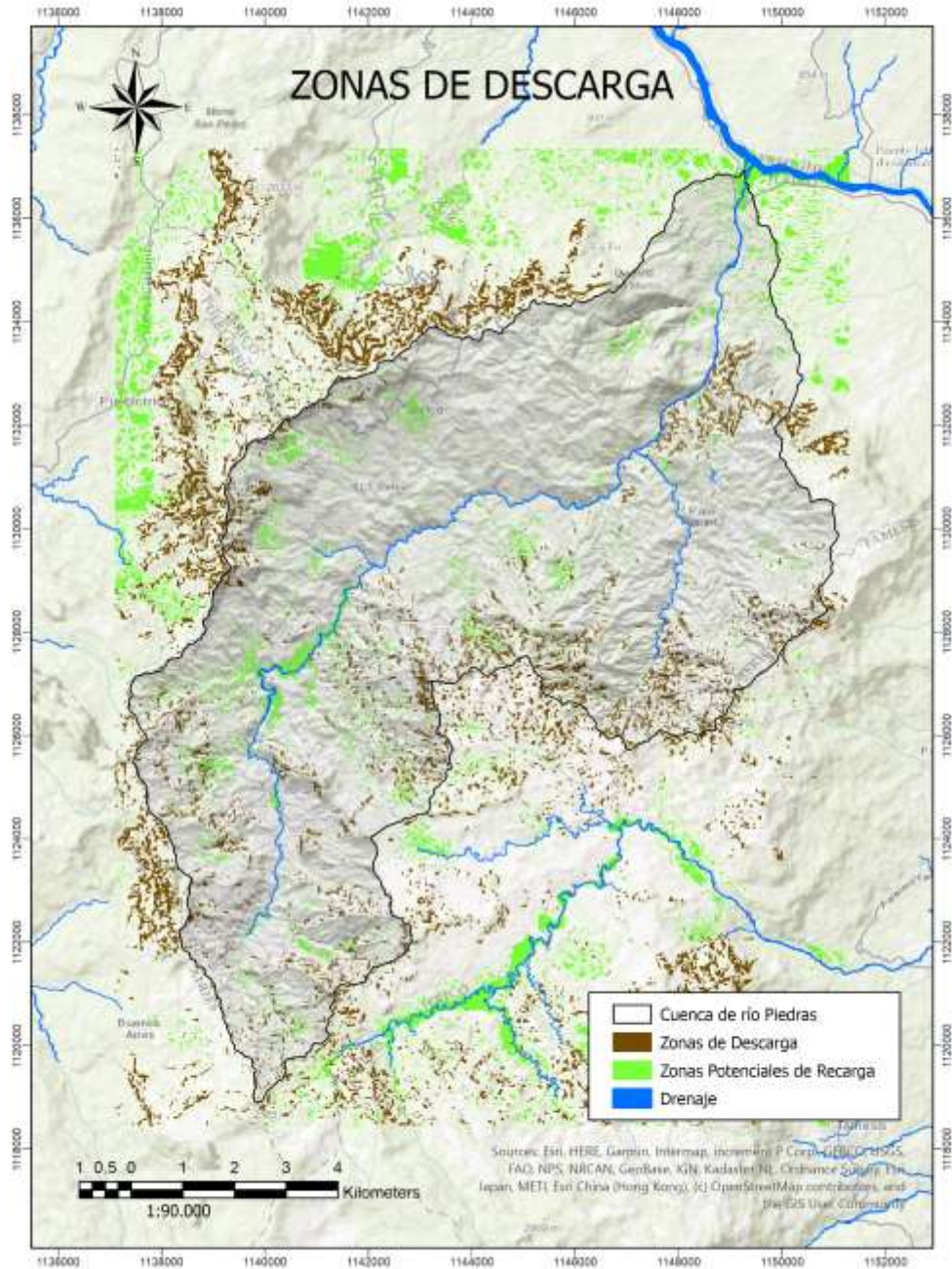


Fig. 19. Zonas de descarga de la cuenca del río Piedras determinada mediante anomalías térmicas junto con zonas potenciales de recarga (Villada, 2021, en construcción).

6.7 Validación de zonas de descarga.

Según los puntos identificados como nacimientos de agua dentro de la cartografía básica del IGAC en escala 1:10000, Se encontró que 68 polígonos coincidieron dentro de las 51 áreas de influencia de nacimientos identificados dentro de los drenajes de primer orden.

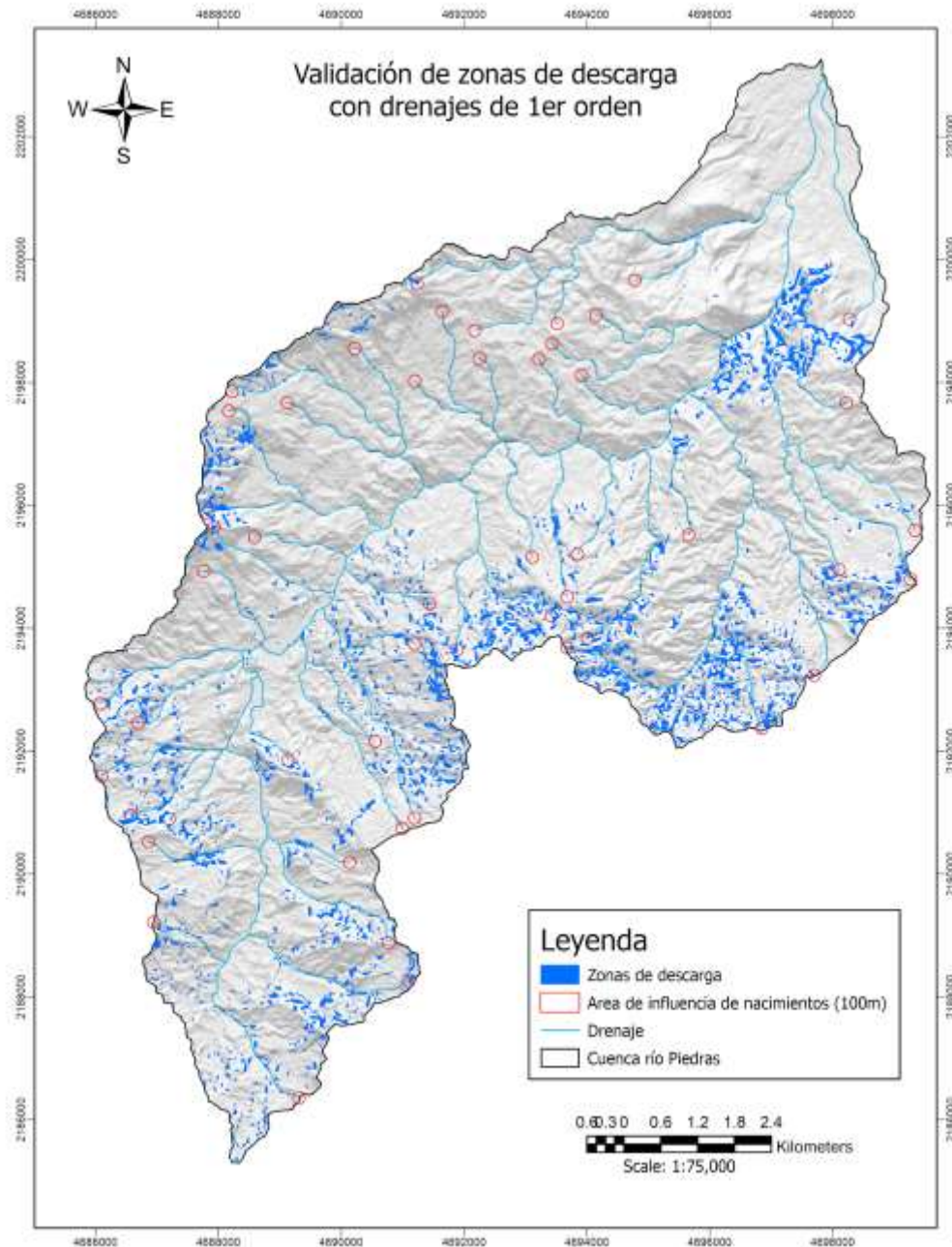


Fig. 20. Mapa de área de influencia de los nacimientos correspondientes a los drenajes de primer orden y su coincidencia con las zonas de descarga hídrica identificadas en esta investigación.

6.8 Modelo conceptual 3D de flujos para la cuenca del río Piedras

Con la finalidad de modelar de forma conceptual como son los flujos de la cuenca del río Piedras, se desarrolló un modelo tridimensional de la cuenca y los espesores relativos de las diferentes formaciones geológicas en la zona de estudio. Para ello se usó el Modelo de Elevación Digital, la red de drenaje principal, los puntos de entrada de agua (ZPR) y puntos de salida del agua (ZPD). Adicionalmente, para la conceptualización de este modelo de flujo local se usaron todos los modelos pertinentes al respecto, entre ellos, el modelo de lineamientos y de aspectos. En conclusión, el modelo tridimensional logrado en esta investigación es cercano al comportamiento real de la naturaleza.

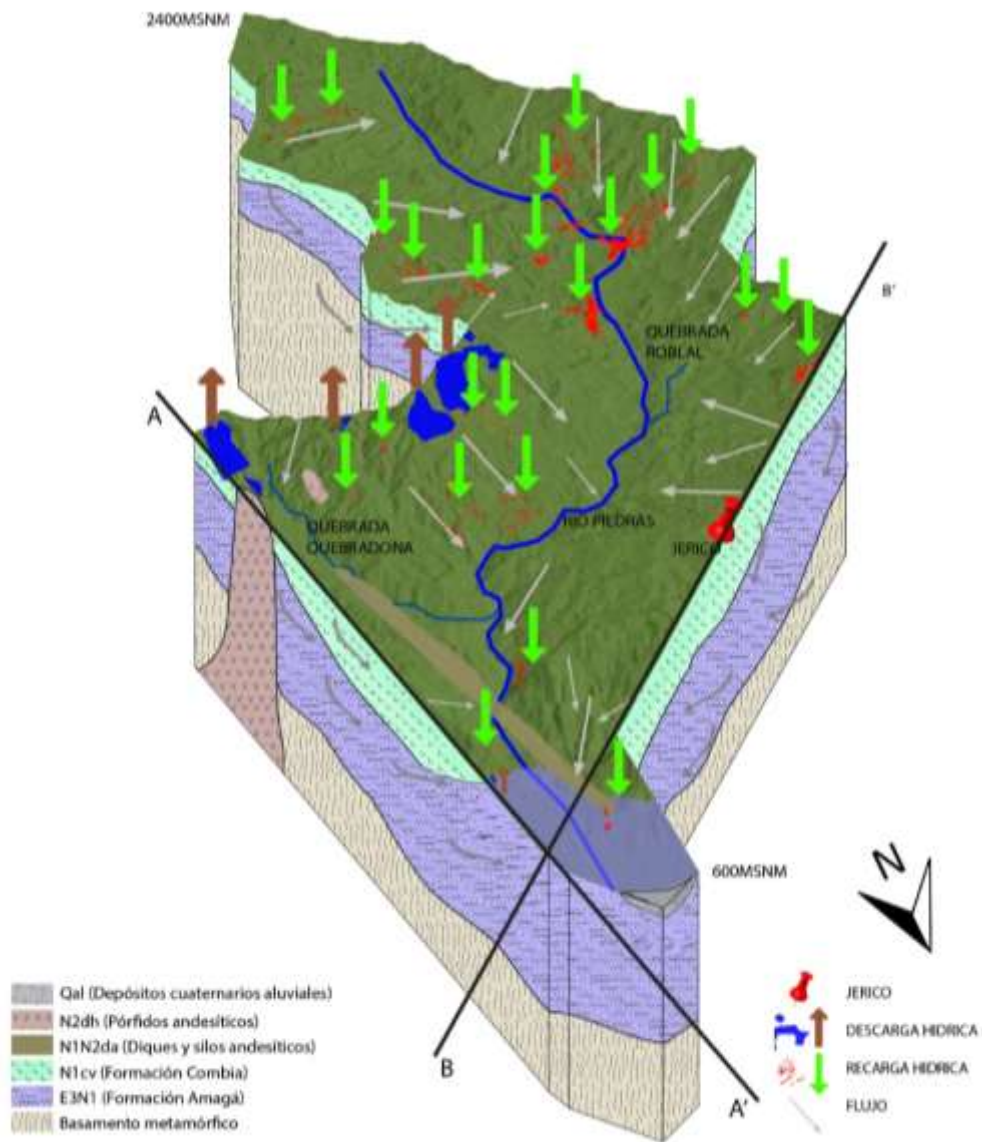


Fig. 218. Modelo conceptual de flujo local en tercera dimensión de la cuenca del río Piedras.

7 DISCUSIÓN

7.1 Geología en tiempos de pandemia

Durante el año 2020 y hasta estos tiempos ha venido ocurriendo un evento de magnitud mundial, la pandemia relacionada con el virus COVID-19 obstaculizó muchas de las actividades cotidianas de los seres humanos, debido a su alto nivel de contagio, los gobiernos implementaron las cuarentenas obligatorias para tener un control del número de contagiados y personas sanas. Durante este confinamiento varias ramas de las ciencias como la medicina y la biología obtuvieron un gran número de avances, sin embargo, las ciencias de la Tierra que tienen como base fundamental las investigaciones en campo, que en este caso se vieron restringidas, causando dificultades para llevar a cabo las validaciones necesarias. Por ello, salir de la ciudad, que fue el caso del equipo de trabajo, requería permisos especiales con los cuales no se contaban. Debido a esto este proyecto de grado tomó la iniciativa de trabajar cada uno de los parámetros de manera remota, con el fin de demostrar la importancia de los sensores remotos y los Sistemas de Información Geográfica en el campo de la hidrogeología.

7.2 Método de asignación de importancia y peso por variable

Las importancias y los pesos utilizados en este caso de estudio son subjetivos debido a que no hay ningún trabajo de esta naturaleza que contemple las variables de temperatura y lineamientos, como también los modelos de terreno de curvatura y de pendientes para identificar las zonas de descarga, en efecto, fue necesario recurrir a la experimentación por medio de ensayos de manera estocástica, asumiendo valores de porcentaje en peso y valores de importancia diferentes para cada ensayo que como se explicó en los resultados se basaron en varios fundamentos teóricos.

La asignación de estos pesos ocasiona que los valores que se asignaron tengan un grado de subjetividad. Sin embargo, son aspectos que se podrían corregir si se hacen estudios futuros con las especificaciones de temporalidad específicas que se mencionaron en la metodología y se reiteran en una sección de esta discusión.

7.3 Nubosidad y anomalías térmicas

La cobertura de nubes que se encuentra usualmente en las imágenes satelitales, puede llegar a ser un obstáculo para la generación de los mapas de temperatura de la superficie terrestre y afectar la identificación de las anomalías térmicas, debido a que las nubes son más frías que la superficie que ha sido irradiada por el sol, un ejemplo es el resultado de la imagen térmica del año 2018, que tiene presencia de polígonos que muestran datos con valores que no corresponden a los rangos comunes de temperatura de la zona, pues los valores arrojados son propios de

glaciares a más de 5000 msnm en latitudes tropicales, caso que no es aplicable para esta cuenca.

Por lo tanto, en próximos estudios similares o afines a este trabajo de grado, se recomienda la elaboración de una corrección atmosférica para el mejoramiento de los datos obtenidos ya que esta técnica permite eliminar defectos de dispersión y absorción de la atmosfera para obtener la reflectancia de la superficie, permitiendo una mejor distribución de los datos y una lectura más acertada con la realidad.

La Fig. 19 corresponde a un mapa de temperaturas para enero del año 2018, generado por imágenes satelitales con nubosidad en la parte alta al suroeste de la cuenca que puede ser un ejemplo específico de estos errores mencionados.

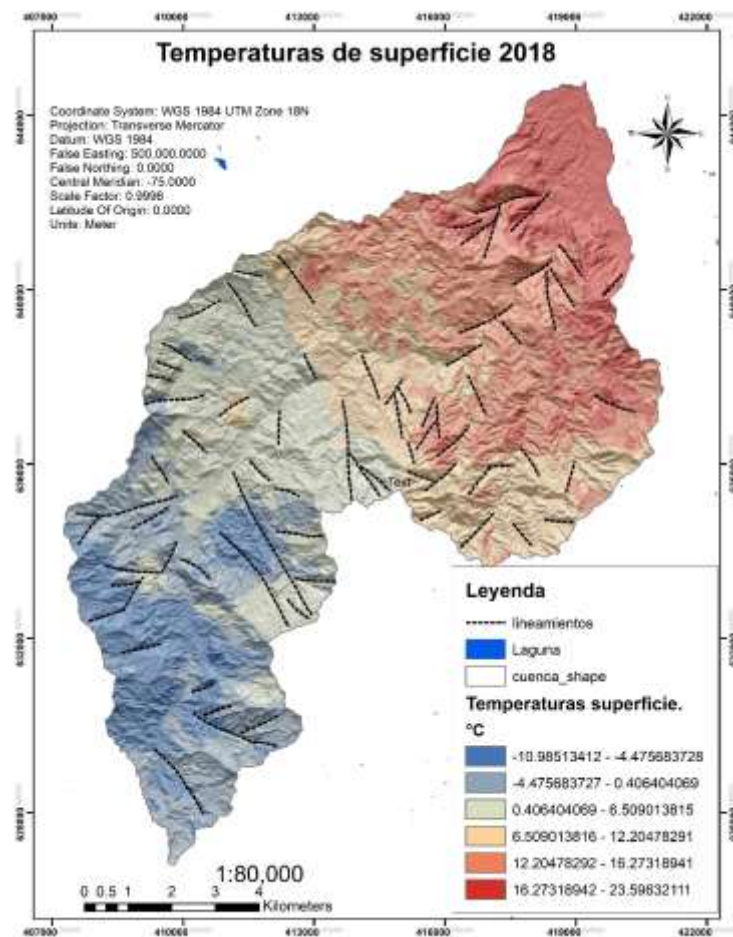


Fig. 19. Mapa de temperaturas para el año 2018 extraído de imágenes satelitales con nubosidad en la parte alta de la cuenca.

7.4 Curvatura y zonas de descarga

Los resultados muestran algunos de los polígonos sobre las laderas con pendientes escarpadas que corresponden a posibles manantiales y un menor número de polígonos asociados a superficies planas que pueden corresponder a humedales,

por último, zonas convexas que suelen asociarse a zonas transicionales de aguas, siendo estas zonas convexas de utilidad para definir flujos superficiales y subsuperficiales de forma cualitativa, como también para definir una dirección general de flujos.

Cabe resaltar que el modelo de curvaturas que se desarrolló a partir del MED, sigue siendo un modelo que tiene un sesgo de error con respecto a la realidad, pues bien, se sabe que tan solo es una representación de ella. Se recomienda, para trabajos posteriores la implementación de una serie de perfiles topográficos, como también con se requiere una validación con un inventario de manantiales, en lugares en específico dentro de la cuenca del río Piedras para corroborar que dichas curvaturas; ya sean cóncavas, convexas y planas se encuentren en los lugares donde se representaron las zonas de descarga hídrica.

7.5 ¿Son estas zonas de descarga, manantiales o humedales?

Si bien la teoría de la hidráulica dice que en la parte baja de la montaña, muy cercano a la desembocadura del río Cauca, hay depósitos aluviales locales, donde se encuentran las zonas de descarga, en este trabajo se pudo mostrar que las zonas de descarga también se pueden encontrar en las partes altas de una cuenca hidrográfica en forma de manantiales, que son descarga puntuales. Como también, se pueden ver lo que denominaríamos humedales a pequeña escala en algunas partes que tienen una curvatura plana, como se ha explicado antes, en la parte media y baja de la cuenca.

Sin embargo, es válido destacar que los polígonos delimitados como zonas de descarga necesitan ser definidos como manantiales o humedales, pero para llegar a definir el tipo de zonas de descarga, es necesario una verificación en campo en algún estudio posterior donde se cuente con; otras metodologías desarrolladas y con más disponibilidad de datos de puntos de agua y/o la implementación de otras tecnologías. Además, es válido incluir dentro de los parámetros a evaluar para alguna metodología que se implemente en estudios afines, la identificación de coberturas vegetales y/o usos de suelo.

7.6 Temperaturas y zonas de descarga

La temperatura no contó con un peso muy significativo en este caso de estudio, ya que las imágenes satelitales térmicas encontradas no correspondían a imágenes nocturnas, las cuales son ideales para este tipo de estudios como se explicó anteriormente, la resolución espacial de los mapas de temperatura en comparación con la de los modelos de terreno posee una resolución menor pues como se ha dicho, debido a que unos cuentan con 100m y los otros con 10 metros respectivamente. En conclusión, valdría la pena usar imágenes satelitales térmicas de otros satélites que tomen las imágenes en un horario nocturno sobre la zona de estudio, con nubosidades mínimas y en zonas con condiciones meteorológicas más marcadas, como también intentar usar imágenes térmicas con una mayor resolución espacial en estudios posteriores y afines.

7.7 Pendientes y zonas de descarga

Las pendientes arrojaron los resultados que se esperaban en cuanto a su relación con las zonas de descarga, ya que las pendientes más escarpadas mostraron unas

zonas donde la descarga parece ser muy puntual, lo que se asemeja a los manantiales, donde el flujo de agua subterránea que emerge a la superficie se desplaza entre las grietas, diaclasas y discontinuidades naturales de la roca.

Por otro lado, los polígonos arrojados sobre las zonas planas, los cuales se esperaba fueran polígonos más grandes y espaciados, en este caso, se muestran más repartidos por el espacio y de tamaños pequeños en comparación con los polígonos sobre cotas mayores. En este caso es válido proponer un aumento de la importancia que se le da a las zonas planas en el procesamiento de los modelos y variables en el álgebra de mapas.

7.8 Lineamientos y zonas de descarga (continuidad de los lineamientos en profundidad)

Recapitulando, en la sección de resultados también se habla sobre el peso asignado para la variable de lineamientos, que debió ser mayor, pero debido a la falta de estudios geofísicos donde se establezcan las características en profundidad de las fracturas, esta variable en específico recibió un valor de porcentaje en peso de 0.15.

Los datos locales sobre lineamientos no cuentan con información como la profundidad efectiva de fractura y buzamiento, que son relevantes para corroborar aún más el modelo conceptual de flujo de aguas subterráneas en la cuenca del río Piedras.

La longitud correspondiente a los lineamientos es otra característica importante para tener en cuenta pues, este puede ser de gran ayuda para la caracterización de los flujos superficiales y subterráneos dentro y fuera de la cuenca, debido a la relación directamente proporcional entre la longitud y la capacidad de los fluidos de circular casi que paralelos a estas estructuras, teniendo en cuenta esto, y observando la Fig. 11, es posible detallar que, en el flanco suroriental de la cuenca, donde está concebido el proyecto minero Quebradona dentro de la cuenca del río Piedras y, donde fueron determinados la mayor cantidad de lineamientos con mayor longitud, esta observación puede ser determinante para la validación de la vulnerabilidad por agentes contaminantes provenientes de esta dirección en estudios medio ambientales más detallados para la gestión del riesgo.

8 CONCLUSIONES

- Los mapas de temperatura superficial del suelo (LST) pertenecientes a los años 2016 y 2020 demostraron coincidencias significativas de la firma térmica en cuanto a la ubicación de las zonas frías en las áreas circundantes de la cuenca, el costado sureste es el que muestra mayores coincidencias, además, en estas mismas áreas se encuentra una concentración importante de los lineamientos generados a escala local, que se relacionan con el origen de zonas de descarga.
- Para este tipo de metodologías es de suma importancia trabajar con imágenes satelitales que cumplan con una hora de captura determinada según el objetivo, posición geográfica y condiciones climáticas, como un contenido mínimo de nubosidad sobre la zona de estudio.
- Dentro de la bibliografía consultada para el desarrollo de esta investigación, proponían que las imágenes satelitales térmicas, la geología, los puntos de agua, modelos de elevación y coberturas son parámetros que se podrían usar para la identificación de zonas de descarga hídrica. Sin embargo, para este caso de estudio no se usó el parámetro de puntos de agua, debido a que el equipo de trabajo no contaba con dicha información, pero en contraprestación con el modelo de elevación digital se crearon diferentes modelos de terreno como pendientes, curvaturas, orientación de la laderas y lineamientos. Cabe destacar que las imágenes satelitales térmicas se usaron como un parámetro no tan importante en comparación con la bibliografía consultada, debido a que, en el trópico, a diferencia de otras latitudes donde se ha aplicado la metodología donde la temperatura cumple un rol esencial en la localización de zonas de descarga, debido a que las temperaturas son más variables y contrastantes.
- El modelo conceptual local de flujos de aguas subterráneas planteado, está fundamentado en los modelos de aspectos o de orientación de las laderas, curvaturas, en el análisis de lineamientos, como también, en la conectividad entre las zonas de descarga y zonas potenciales de descarga. A partir de esto se establece que en la parte baja de la cuenca los flujos van en dirección NW y NE, para la parte media de la cuenca están en dirección WE, NW y NE. Por último, en la parte alta de la cuenca se tiene flujos predominantemente al NE.
- Como es bien sabido, la cuenca del río Piedras es una cuenca de montaña donde dominan varios climas, dependiendo de la altura sobre el nivel del mar en la que se encuentre, por esto hay microclimas que generan variaciones en la temperatura, que ocasionan dificultades en la estandarización de una temperatura mínima para el agua subterránea que ayude a establecer las anomalías térmicas.
- La geología de la zona de estudio es beneficiosa para la iteración de los flujos de aguas que se infiltran en la matriz de sedimentos finos de la formación Combia y Amagá, como también para los flujos de agua subterránea que emergen a la

superficie, pues como se mencionó en la sección de geología, dichas formaciones geológicas corresponden a rocas vulcano-sedimentarias, como también depósitos de vertiente matriz-soportados y de materiales que tienen permeabilidades primarias y secundarias a causa de las múltiples discontinuidades cartografiadas.

- Es necesario validar esas zonas de baja temperatura con un inventario de manantiales y medición de parámetros físico-químicos para estudios posteriores y afines con la identificación de zonas de descarga con imágenes satelitales térmicas.

8. REFERENCIAS

- Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Lhissou, R., Maacha, L., Azmi, M., ... & Bachaoui, E. M. (2017). Comparison of Landsat-8, ASTER and Sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of Sidi Flah-Bouskour inlier, Moroccan Anti Atlas. *Advances in Space Research*, 60(11), 2355-2367.
- Avdan, U., y Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, 2016.
- Barron, O., y Van Niel, T. G. (2009). Application of thermal remote sensing to delineate groundwater discharge zones. *International Journal of Water*, 5(2), 109-124
- Becker, M. W. (2006). Potential for satellite remote sensing of ground water. *Groundwater*, 44(2), 306-318.
- Blyth, K. (1985). Remote Sensing and water resources engineering. In *Remote sensing in civil engineering* (pp. 289-334).
- Bruning, J. N., Gierke, J. S., & Maclean, A. L. (2011). An approach to lineament analysis for groundwater exploration in Nicaragua. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 77(5), 509-519.
- Brunner, P., Franssen, H. J. H., Kgotlhang, L., Bauer-Gottwein, P., & Kinzelbach, W. (2007). How can remote sensing contribute in groundwater modeling? *Hydrogeology journal*, 15(1), 5-18.
- Calle, B., y González, H. (1980). *Geología y geoquímica de la plancha 166, Jericó*. vol. Informe N, 232.
- Carmona, O. O., Marín, M. V., Iregui, H. G., Herrera, E. C., Ruiz, C., Rendón-Ramirez, A. P., y Rios-Restrepo, C. Generalidades del sistema de fallas de romeral en las cercanías a medellin.
- Deepa, S., Venkateswaran, S., Ayyandurai, R., Kannan, R., & Prabhu, M. V. (2016). Groundwater recharge potential zones mapping in upper Manimuktha Sub basin Vellar river Tamil Nadu India using GIS and remote sensing techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(3), 137.
- Das, S., Pardeshi, S. D., Kulkarni, P. P., y Doke, A. (2018). Extraction of lineaments from different azimuth angles using geospatial techniques: a case study of Pravara basin, Maharashtra, India. *Arab J Geosci* 11 (8): 160.
- E. Pardo-Iguzquiza, J. D.-E.-R. (2014). Análisis del relieve kárstico mediante el modelo digital de elevaciones. Aplicación a la Sierra de las Nieves (provincia de Málaga). *Boletín Geológico y Minero*, 381-389.

Elewa, H. H. (2006). *Water resources and geomorphological characteristics of Tushka and west of Lake Nasser, Egypt. Hydrogeology Journal, 14(6), 942-954.*

Escobar, J., Betancur, T., & Díaz, R. (2018). *Delimitación de una cuenca subterránea en un medio fracturado a partir de un modelo SIG de escala detallada. Doi:10.13140*

Escalante, E. F., Fraile, M. A. S. M., & Serrano, F. S. (2014). *El hidroegeoportal DINA-MAR. Aplicación en soporte GIS para determinar zonas susceptibles de aplicar técnicas de recarga gestionada en España. Boletín geológico y minero, 125(3), 341-368.*

Gillespie, J., Nelson, S. T., Mayo, A. L., y Tingey, D. G. (2012). *Why conceptual groundwater flow models matter: a trans-boundary example from the arid Great Basin, western USA. Hydrogeology Journal, 20(6), 1133-1147.*

Huang, T., Ma, B., Pang, Z., Li, Z., Li, Z., & Long, Y. (2019). *How does precipitation recharge groundwater in loess aquifers? Evidence from multiple environmental tracers. Journal of Hydrology, 583, 124532.*

Huntley, D. 1978. *On the detection of shallow aquifers using thermal infrared imagery. Water Resources Research, 14(6), 1075-1083.*

IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua. Bogotá D.C: Panamericana Formas e Impresos S.A.*

Jasmin, I., & Mallikarjuna, P. (2011). *Satellite-based remote sensing and geographic information systems and their application in the assessment of groundwater potential, with particular reference to India. Hydrogeology Journal, 19(4), 729-740.*

Kobayashi, C., Orihashi, Y., Hiarata, D., Naranjo, J. A., Kobayashi, M., & Anma, R. (2010). *Compositional variations revealed by ASTER image analysis of the Viedma Volcano, southern Andes Volcanic Zone. Andean geology, 37(2), 433-441.*

Martínez Alfaro, P. E., Martínez Santos, P., y Castaño, S. (2006). *Fundamentos de hidrogeología. Mundi-Prensa Libros.*

Matus, O., Faustino, J., & Jiménez, F. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba (Costa Rica).*

Palacio B. Andrea, B. T. (2007). *Identificación de fuentes y zonas de recarga a un sistema acuífero a partir de isótopos estables del agua. Investigación Universidad de Antioquia, vol.10. número 4.*

Rios-Sanchez, M., Gierke, J. S., & Muñoz-Martínez, T. (2012). *Hydrogeological Characterization of the Plateaus Region of the Quito Aquifer System Using Remote Sensing, Digital Geomorphology, and Geophysics*. In *World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries* (pp. 85-97).

RODRÍGUEZ-RAMOS, B. V. (2008.). RODRÍGUEZ-RAMOS, B., *Teledetección y SIG aplicados a la Exploración Geológico-Geofísica en el Altiplano Nariñense*.

Sass, G. Z., Creed, I. F., Riddell, J., y Bayley, S. E. (2014). *Regional-scale mapping of groundwater discharge zones using thermal satellite imagery*. *Hydrological Processes*, 28(23), 5662-5673.

Solomon, S., y Quiel, F. (2006). *Groundwater study using remote sensing and geographic information systems (GIS) in the central highlands of Eritrea*. *Hydrogeology Journal*, 14(6), 1029-1041.

Tamborski, J. J., Rogers, A. D., Bokuniewicz, H. J., Cochran, J. K., y Young, C. R. (2015). *Identification and quantification of diffuse fresh submarine groundwater discharge via airborne thermal infrared remote sensing*. *Remote Sensing of Environment*, 171, 202-217.

Villada, I. A., (2021). *Identificación de zonas potenciales de recarga mediante análisis morfológico, técnicas de teledetección y SIG: caso de estudio suereste Antioqueño (preparación)*.